

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ

КУРС ЛЕКЦІЙ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний
посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою
програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2020

Електротехнологічні установки та системи: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» / КПІ імені Ігоря Сікорського; уклад.: В.О. Бржезицький, Я.О. Гаран, М.Ю. Лапоша, Є.О. Троценко. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,70 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 136 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 05.11.2020 р.)
за поданням Вченої ради Факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 2 від 28.09.2020 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА СИСТЕМИ

КУРС ЛЕКЦІЙ

Укладачі:

Бржезицький Володимир Олександрович
Гаран Ярослав Олександрович
Лапоша Микола Юрійович
Троценко Євгеній Олександрович

Відповідальний
редактор:

Проценко О.Р., канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри
теоретичної електротехніки КПІ імені Ігоря Сікорського

Рецензенти:

Подольцев О.Д., доктор техн. наук, провідний науковий
співробітник Інституту електродинаміки НАН України

Куєвда В.П., канд. техн. наук, професор, професор кафедри
електропостачання та енергоменеджменту Національного
університету харчових технологій

Подано матеріал лекцій кредитного модуля «Електротехнологічні установки та системи». Викладено основні поняття структури сучасних технологічних систем і, зокрема, електротехнології. Надана класифікація електротехнологій. Розглянуто особливості використання нерівноважної низькотемпературної плазми та коронного розряду в електростатичних технологічних установках. Охарактеризовані технологічні процеси електрогазоочищення, електрофарбування та нанесення порошкових покриттів в електричному полі, електросепарації матеріалів, електродруку, нейтралізації зарядів статичної електрики та зневоднення нафтопродуктів. Детально розглянуті технології з використанням плазмо-хімічних реакції в нерівноважній плазмі, зокрема, електросинтез озону та його застосування у сфері вирішення екологічних питань.

Курс лекцій призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня підготовки за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ТЕМА 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ.....	5
<i>Лекція №1</i> Структура та основні складові технологічних систем	5
ТЕМА 2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЇ.....	8
<i>Лекція №2</i> Електротехнологічні установки та системи, класифікація електротехнологій	8
ТЕМА 3 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ФІЗИКИ ПЛАЗМИ	12
<i>Лекція №3</i> Визначення плазми та її основні властивості	12
ТЕМА 4 КОРОННИЙ РОЗРЯД	16
<i>Лекція №4</i> Електрон-іонні процеси в коронному розряді.....	16
ТЕМА 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЗАСНОВАНІ НА СИЛОВОМУ ВПЛИВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МАТЕРІАЛИ.....	22
<i>Лекція №5</i> Процеси електричного зарядження частинок матеріалів.....	22
<i>Лекція №6</i> Процеси, що пов'язані з переміщенням частинок в електричному полі.....	31
ТЕМА 6 ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ЧАСТИНОК У ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАХ	37
<i>Лекція №7</i> Процеси, що відбуваються в електрофільтрах	37
ТЕМА 7 НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ.....	46
<i>Лекція №8</i> Процеси електрофарбування та нанесення порошкових покриттів.....	46
ТЕМА 8 ЕЛЕКТРОСЕПАРАЦІЯ	55
<i>Лекція №9</i> Електросепарація матеріалів	55
ТЕМА 9 ЕЛЕКТРОДРУК	65
<i>Лекція №10</i> Процеси електродрукування	65
ТЕМА 10 НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ ЗАРЯДІВ СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ	73
<i>Лекція №11</i> Процеси нейтралізації небезпечних зарядів статичної електрики	73
<i>Лекція №12</i> Вимірювання статичної електризації та способи захисту від розрядів, спричинених її дією.....	79
ТЕМА 11 ЗНЕВОДНЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ	86
<i>Лекція №13</i> Електротехнологічні процеси зневоднення нафтопродуктів.....	86
<i>Лекція №14</i> Промислові електротехнологічні установки для зневоднення і зневоднення нафтопродуктів	93
ТЕМА 12 ТЕХНОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМО-ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ....	99
<i>Лекція №15</i> Плазмо-хімічні процеси та їх використання.....	99
<i>Лекція №16</i> Процеси електросинтезу та промислові генератори озону	105
<i>Лекція №17</i> Області використання озонових технологій.....	114
<i>Лекція №18</i> Технології, засновані на використанні нерівноважної плазми газового електричного розряду	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131
Перелік питань для контролю засвоєння лекційного матеріалу навчальної дисципліни «Електротехнологічні установки та системи»	133

ВСТУП

Курс лекцій «Електротехнологічні установки та системи» призначений для дистанційного вивчення відповідної навчальної дисципліни студентами 2 курсу першого (бакалаврського) рівня підготовки за спеціальністю 141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» Факультету електроенерготехніки та автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Зміст лекційного матеріалу, що пропонується, відповідає програмі навчальної дисципліни та робочій програмі кредитного модуля «Електротехнологічні установки та системи» обсягом 36 академічних годин.

В першій частині лекційного курсу викладаються загальні основні поняття і визначення технології та, зокрема, електротехнології, які стосуються матеріальної сфери, складових технологічних процесів, інформаційного забезпечення та систем управління промислового виробництва (Лекції №1, №2).

В лекції №3 викладаються основні поняття фізики низькотемпературної плазми, що необхідно для розуміння студентами розглянутих в подальшому питань технологічного використання коронного розряду в електрофільтрах для очищення димових газів електростанцій та металургійного виробництва (Лекції №4 – №7). З використанням цих лекційних матеріалів на практичних заняттях з дисципліни студенти розраховують рухливість електронів в плазмі гелій-неонового лазера, досліджують залежність ступеня очищення газів в електрофільтрі від його параметрів.

В лекціях №8 – №10 викладаються основи технологічних систем застосування електрофарбування в машинобудуванні та електросепарації в гірничо-видобувній промисловості. Зокрема, на основі розгляду в лекційних матеріалах процесів, що відбуваються в коронному камерному сепараторі, на практичних заняттях студенти проводять розрахунки пристроїв відділення частинок золота від піску без використання нині дефіцитної води.

В лекціях №11, №12 викладаються процеси нейтралізації зарядів статичної електрики, що є особливо важливими виходячи з питань техніки безпеки в нафтовій та нафтопереробній промисловості.

В лекціях №13, №14 розглядаються близькі за призначенням питання зневоднення і знесолення нафтопродуктів, що забезпечують досягнення їхньої високої якості.

В лекціях №15 – №18 викладаються технологічні питання використання плазмохімічних реакцій, зокрема, для промислової генерації озону, а також електророзрядної конверсії топкових газів. Розглядаються основні області технологічного використання озону, серед яких – підготовка питної води, обробка стічних вод, медичні технології. Спільне використання електрофільтрів та електророзрядної конверсії топкових газів є основою забезпечення екологічної безпеки в умовах подальшого розвитку промислового виробництва.

ТЕМА 1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ

Лекція №1 Структура та основні складові технологічних систем

Термін *технологія*, який походить від *techné* (з грецької мови – майстерність, уміння) – означає сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу чи напівфабрикату, що застосовуються в процесі виробництва для одержання готової продукції. Технологія як система знань – це наука про способи впливу на сировину, матеріали та напівфабрикати відповідними знаряддями виробництва. Технологія є загальним поняттям як для промислового, сільськогосподарського, так і для будь-якого виробництва готової продукції.

Не випадково, наприклад, що один з провідних технічних вищих навчальних закладів світу має назву Массачусетський технологічний інститут.

Основними складовими типового виробництва продукції є:

- матеріальна сфера;
- виробничий (технологічний) процес;
- інформаційне забезпечення;
- система управління (керування).

1.1 До матеріальної сфери відносяться:

– предмет виробництва (об'єкт обробки) – матеріальна субстанція, що перетворюється в процесі виробництва в готову продукцію (або її складову частину);

– знаряддя виробництва, що, в свою чергу, поділяються на дві частини:

➤ технологічне обладнання, яке є основним по капітальним витратам, порівняно незмінне у часі (будівлі, магістралі водо-, газо-постачання, система електропостачання, верстати, підйомально-транспортне обладнання);

➤ технологічна оснастка – додаткове технологічне обладнання, змінне у часі, незначне по капітальним витратам, яке додається до основного технологічного обладнання для виконання частини технологічного процесу (наприклад, різці, свердла тощо);

– контрольно-вимірювальне обладнання;

– обладнання системи управління (керування) – розглядатиметься далі окремо.

1.2 *Виробничий процес* – повний цикл виготовлення певної продукції, починаючи із закупівлі висхідних матеріалів, деталей, напівфабрикатів та закінчуючи виготовленням та реалізацією цієї продукції.

Технологічний процес – це частина виробничого процесу, яка цілеспрямована на необхідне, передбачене змінювання предмету виробництва та визначення його поточного стану.

Технологічна операція – це окрема частина технологічного процесу, що характеризується одним видом обробки предмету виробництва.

Технологічний контроль передбачає визначення стану предмета виробництва за допомогою контрольно-вимірювального обладнання до-, в ході виконання – та після виконання частини технологічного процесу.

1.3 *Інформаційне забезпечення* (окрім того, що відноситься до системи управління, яка розглядатиметься далі окремо) – призначене для інформування персоналу контролю, розробників та виконавців технологічних процесів про установлені міжнародні, державні та відомчі вимоги до відповідної організації будь-яких виробництв, зокрема це системи стандартів ISO (International Organization for Standardization) і інші документи:

- стандарти серії ISO 9000 «Системи менеджменту якості» (продукції);
- стандарти серії ISO 14000 «Система екологічного менеджменту» (виробництва продукції);
- стандарти Єдиної системи технологічної документації;
- стандарти Єдиної системи технологічної підготовки виробництва;
- технологічна документація – графічні та текстові документи, які визначають технологічні процеси виготовлення продукції. Серед них – технологічні, маршрутні, операційні карти, інструкції, операційні креслення, конструкторська документація на виріб за вимогами Єдиної системи конструкторської документації, відомості замовлення та норми витрати матеріалів.

Як приклад: технологічна карта описує процес обробки предмету виробництва, визначає послідовність операцій та їх складові частини, необхідні матеріали, виробниче устаткування, кваліфікацію працівників.

Як бачимо, конструювання, конструкторська розробка відповідає на питання: що зробити, виготовити, з якими параметрами? Якою повинна бути продукція?

Технологія ж відповідає на питання: як цю продукцію виготовити з мінімальними витратами? Як забезпечити високу якість продукції, її надійність в експлуатації?

Тому останнім часом «досягнення техніки» все більше зміщуються до розвитку передових технологій виготовлення відповідної техніки.

1.4 *Система управління (керування) виробництвом* – сучасні технології обов'язково передбачають автоматизацію – процес розвитку машинного виробництва, при якому функції управління та контролю, які раніше виконувалися людиною, передаються приладам та автоматичним пристроям.

Розрізняють часткову автоматизацію виробництва, яку здійснюють в тих випадках, коли безпосереднє керування складними, швидкоплинними процесами стає практично недоступним для людини або коли процес ведеться в умовах, небезпечних для життя.

При комплексній автоматизації виробництва участок (дільниця), цех, завод діють як єдиний взаємопов'язаний автоматичний комплекс. Комплексна автоматизація виробництва доцільна на основі вдосконалення технологій та прогресивних методів керування із застосуванням надійних засобів автоматизації та виробничого обладнання, що діють за заданою програмою або за програмою, що саморганізується, при загальному контролі усього комплексу з боку людини.

Повна автоматизація виробництва передбачає управління комплексно-автоматизованим виробництвом без участі людини; використовується, коли

виробництво є рентабельним, стабільним, його режими відносно незмінні, а також в умовах недоступності або підвищеної небезпеки для життя людини.

В сучасних умовах гострої ринкової конкуренції управління виробництвом обов'язково передбачає врахування економічних факторів, використання організаційних методів менеджменту та стратегії маркетингу.

1.5 Автоматизована система управління технологічним процесом, підприємством (АСУ ТП) – сукупність адміністративних, організаційних, економіко-математичних методів та технічних засобів контрольно-вимірювальної і обчислювальної техніки, оргтехніки та засобів зв'язку, взаємопов'язаних в єдину людино-машину систему для прийняття управлінських рішень. АСУ ТП містить у своєму складі забезпечуючі та функціональні підсистеми.

До забезпечуючих підсистем відносяться: технологічне, математичне, організаційне та інформаційне забезпечення, яке в автоматизованих системах являє собою наявність єдиної системи класифікації та кодування, уніфікованих масивів інформації та документації. Функціональні підсистеми вирішують завдання обліку, контролю, планування та управління виробничою діяльністю. Головна ланка в АСУ ТП – ЕОМ (або комплекс ЕОМ, об'єднаних у обчислювальний центр), яка пов'язана з усіма іншими ланками системи каналами зв'язку, по яким інформація поступає знизу вгору, а розпорядження, команди та корективи – зверху вниз, частково або повністю автоматизуються процеси збирання, реєстрації, збереження та оброблення інформації.

В залежності від рівня організаційної будови АСУ ТП виробниче підприємство може мати у своєму складі:

- верстати з ЧПУ-числовим програмним управлінням;
- МП-мікропроцесорні підсистеми управління окремими ланками технологічного процесу;
- ГВК-гнучкі виробничі комплекси окремих цехів, які до вищезазначеного обладнання доповнені транспортувально-накопичувальними, контрольними та сигнальними пристроями.

ТЕМА 2 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

Лекція №2 Електротехнологічні установки та системи, класифікація електротехнологій

Електротехнологія обов'язково пов'язана з використанням електроенергії, але саме використання електроенергії не є достатньою ознакою електротехнології. Як приклад, обробка на токарному верстаті (хоча відбувається з використанням електроенергії) – не є електротехнологією. Але, якщо замість різця використати струмінь плазми плазмотрона – будемо мати електротехнологічний процес обробки, наприклад, високотемпературного сплаву високої твердості.

Отже, електротехнологія – сукупність методів обробки, виготовлення, зміни стану, властивостей, форми сировини, матеріалу чи напівфабрикату, що ґрунтується на використанні однієї або декількох форм енергії електромагнітного поля та їх перетворенні, безпосередньо, в робочій області впливу та ціленаправленого змінювання предмету виробництва для одержання (у підсумку) готової продукції.

До електротехнології, як різновиду технології, відносяться всі загальні поняття і визначення, розглянуті в попередній лекції. Але, разом з тим, існують узагальнені структурні особливості, які розглянемо далі.

2.1 Структура електротехнологічного комплексу представлена на рис. 2.1.

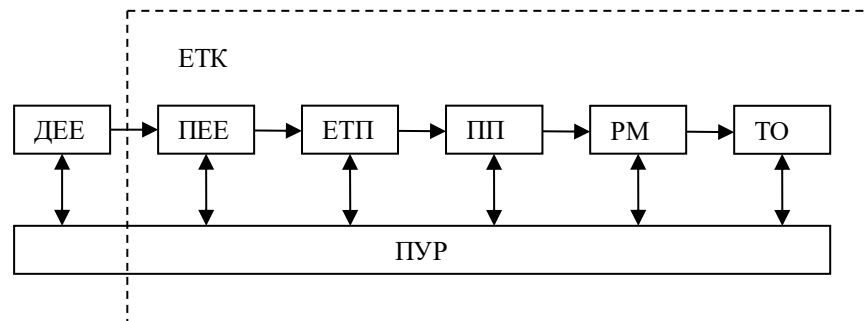


Рис. 2.1 – Структурна схема електротехнологічного комплексу

1) ДЕЕ – джерело електричної енергії, в якості якого може виступати перетворювач будь-якого виду енергії в електричну енергію (автономні джерела електроживлення, вторинні джерела електроживлення, акумуляторні і сонячні батареї, фотоелементи, термопари тощо). Крім цього, ДЕЕ може бути промисловою мережею, енергосистемою, електромережею транспортних засобів і рухомих об'єктів.

2) ПЕЕ – перетворювач електричної енергії, пристрій, що перетворює електричну енергію з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами (трансформатори, напівпровідникові перетворювачі, високочастотні електричні машини, керовані вентильні перетворювачі з автоматичним регулюванням зовнішньої характеристики тощо), призначений для узгодження параметрів джерела електричної енергії із параметрами

електротехнологічного пристрою, а також управління електротехнологічним пристроєм відповідно до сигналів пристрою управління.

3) ЕТП – електротехнологічний пристрій, що перетворює електричну енергію в енергію іншого виду (механічну, теплову, хімічну, гідравлічну, акустичну, світлову), яка називається «технологічною».

4) ПП – перетворювальний пристрій виконує перетворення «технологічної» енергії із одними параметрами в інші (редуктори, мультиплікатори, гідропідсилювачі, пневмопідсилювачі, пристрої каналізації теплової енергії, системи охолодження тощо), призначений для узгодження параметрів електротехнологічного перетворювача енергії із параметрами робочого процесу і управління робочим процесом відповідно до сигналів пристрою управління і регулювання.

5) РМ – робочий механізм. До нього належить частина вищенаведеного електроустаткування, що безпосередньо забезпечує реалізацію необхідних робочих дій у конкретному технологічному процесі (високотемпературні камери для термохімічної обробки виробів із чорних і кольорових металів, вузли, механізми і машини, приведені у рух механічними двигунами).

6) ТО – технологічний об'єкт – це об'єкт, який піддається перетворенням у результаті виконання технологічних операцій, саме для нього створений даний електротехнологічний комплекс.

7) ПУР – пристрій управління. До нього належать інформаційні системи, що забезпечують управління і регулювання параметрів перетворення енергії у ході виконання технологічного процесу.

8) ЕТК – електротехнологічний комплекс, підсистема електротехнологічної системи, що призначений для реалізації певних взаємодій у заданому технологічному процесі.

2.2 Електротехнологічна система, яка містить розглянутий електротехнологічний комплекс як підсистему, додатково охоплює ДЕЕ – джерело електричної енергії, пристрої подачі та виведення ТО з ЕТК, а також управління ними, підсистему взаємодії ЕТК з оточуючим середовищем, магістралі газо- та водопостачання ЕТК (в разі необхідності). Що стосується ПУР-пристрою управління в схемі рис. 2.1, то в узагальненому випадку електротехнологічної системи – це, фактично, АСУ ТП, розглянута в попередній лекції.

2.3 Електротехнологічна установка – термін в даній дисципліні, описує основну сутність технологічного процесу того або іншого електротехнологічного комплексу з конкретизацією його вхідних та вихідних параметрів. «Електротехнологічна система» в даній дисципліні – це поєднання опису технологічного процесу з джерелом електричної енергії, як правило, високої напруги, та його характеристиками.

3.3 Класифікація електротехнологій з урахуванням різноманітності форм електромагнітної енергії та її перетворень, особливих умов по складу діючих речовин, їх фізичному стану, термічним режимам, супроводжуваним фізичним та хімічним перетворенням налічує декілька сотень різновидів електротехнологій. Нижче наводимо перелік основних видів електротехнологій,

що вивчаються студентами спеціалізації «Електротехнологічні пристрої та електротехнологічні комплекси»:

3.3.1 *Електростатична технологія*, заснована на впливі електростатичних полів на оброблювані матеріали. Серед сфери застосування цієї технології:

– *Електрогазоочищення* – виведення з потоків газів твердих або рідких частинок, що містяться в них. Електрофільтри є обов'язковою частиною котелень топок електростанцій, цементних печей, що обертаються, установок з виробництва сірчаної кислоти та ряду інших подібних виробництв. У зв'язку з цим у всьому світі посилено проводяться наукові дослідження з інтенсифікації електрогазоочищення.

– *Електросепарація* – розділення різних сумішей матеріалів (наприклад, цінних компонентів руд і порожньої породи), що використовує відмінність умов зарядження, руху та утримання на електродах компонентів, що розрізняються за своїми електричними властивостями, розмірами, густиною, масою, формою та іншими ознаками.

– *Електропокриття* – нанесення декоративних і захисних покриттів на різні вироби. При цьому для нанесення покриттів можуть використовуватися як рідкі лакофарбові матеріали, так і тверді полімерні порошки. У всіх випадках при цьому має місце суттєве зменшення витрат покривних матеріалів у порівнянні з іншими методами нанесення покриттів і в результаті – істотна економія дорогих матеріалів при одночасному поліпшенні якості покриттів.

– *Електродрук* – отримання багаторазових копій з оригіналу з використанням коронного розряду. Технологічний процес отримання копій включає зарядження пластинки фотопровідника в полі коронного розряду, проявлення її при проекції зображення оригіналу на платівку, напилення порошкового барвника та перенесення барвника на папір.

3.3.2 *Електророзрядна технологія*, що заснована на взаємодії продуктів коронного розряду з оброблюваними матеріалами, використовує різні форми нерівноважної низькотемпературної плазми для інтенсифікації хімічних реакцій, промислової генерації озону, конверсії топкових газів, модифікації поверхні матеріалів з метою набуття їх особливих властивостей, електроерозійної обробки металів.

3.3.3 *Технологія перетворення електроенергії в теплову енергію* використовується в електричних нагрівальних елементах промислових електропечей опору та установках прямого нагріву, в дугових електропечах виплавки сталі, рудовідновлювальних печах, вакуумних дугових печах, установках електрошлакового переплаву, установках індукційного та діелектричного нагріву.

3.3.4 *Плазмова технологія* використовується в плазмових електротермічних установках, які дозволяють реалізувати малостадійні та високоентальпійні технологічні процеси з широким регулюванням термодинамічного режиму у провідних галузях промисловості: металургії, хімії та машинобудуванні. Плазмове технологічне обладнання відрізняється високою продуктивністю, малими габаритними розмірами та високої якістю обробки

матеріалів, що пояснюється високою концентрацією та направленістю перенесення енергії при плазмовому нагріві.

3.3.5 *Технологія перетворення електричної енергії в енергію світла* використовується у численних джерелах випромінювання, як видимого, інфрачервоного, так і ультрафіолетового діапазонів. Галузь світлотехніки особливо бурхливо розвивається в останні роки виходячи з рівня зростаючих потреб людства у дизайні світлового середовища.

3.3.6 *Лазерна технологія* використовує особливий вид резонансно підсиленого концентрованого монохроматичного випромінювання з густиною виділення енергії до 10^{12} Вт/см², що забезпечує різання, зварювання, руйнування любых матеріалів, практично, на відстанях в десятки метрів та кілометрів від джерела енергії.

3.3.7 *Електронно- та іонно-променева технологія* використовує пучки електронів та іонів, прискорених у вакуумі до високих енергій, для проведення особливо високоякісного зварювання відповідальних конструкцій для атомних електростанцій, авіа- та ракетобудування, створення нових видів матеріалів.

3.3.8 *Електрогідравлічна технологія* використовує вплив імпульсного високовольтного розряду в рідині (технічній воді) для штампування деталей з важко-деформуючих матеріалів або складною конфігурацією, дроблення крихких матеріалів (будівельних матеріалів, геологічних проб, некондиційного бетону, негабаритів і т.д.), очищення лиття від формувальної землі, руйнування каменів в нирках людини без хірургічного втручання, активізації нафтових свердловин та ехолокації водойм.

3.3.9 *Магнітно-імпульсна технологія* дозволяє досягати безконтактним способом швидкості переміщення металевих предметів до 1000 м/с (електромагнітні гармати), що також відкриває широкі можливості для штампування важкооброблюваних звичайними способами матеріалів, їх зварювання тощо.

Перші два види електротехнологій вивчаються в даній дисципліні «Електротехнологічні установки та системи». Решта – в інших навчальних дисциплінах спеціалізації «Електротехнологічні пристрої та електротехнологічні комплекси».

ТЕМА 3 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ФІЗИКИ ПЛАЗМИ

Лекція №3 Визначення плазми та її основні властивості

Плазмою називають іонізований газ, що містить вільні позитивно і негативно заряджені частинки, в якому сумарний заряд в кожній одиниці об'єму прагне до нуля, тобто плазма являє собою електрично-нейтральне середовище.

У загальному випадку плазма може складатися з позитивно заряджених іонів, негативно заряджених частинок – електронів і негативних іонів – і нейтральних частинок. Відношення числа електронів n_e (або іонів) в одиниці об'єму плазми до повного числа частинок n в цьому ж об'ємі $m = n_e / n$ називають *ступенем іонізації плазми*. В граничному випадку, коли число нейтральних частинок в плазмі прагне до нуля, плазма називається *повністю іонізованою*, для якої $m \rightarrow 1$. У технічних пристроях, як правило, мають справу з неповністю або *частково іонізованою* плазмою, для якої $m \ll 1$.

Ступінь іонізації плазми в залежності від умов її утворення та існування може змінюватися в широких межах. Стовп тліючого розряду – це слабо-іонізований газ із ступенем іонізації порядку $10^{-8} \div 10^{-6}$. Позитивний стовп дугового розряду при атмосферному і більш високих тисках має ступінь іонізації порядку $10^{-3} \div 10^{-1}$.

Відповідно до величини концентрації частинок може бути розріджена плазма, прикладом якої є іоносфера Землі, в якій концентрація електронів становить 10^5 1/см³, або плазма в стовпі тліючого розряду при низькому тиску газу, і щільна плазма, наприклад, в каналі лідера при розряді в довгих повітряних проміжках або в каналі блискавки, в якому концентрація електронів може досягати $(1 \div 5) \cdot 10^{17}$ 1/см³.

Залежно від умов, в яких утворена і знаходиться плазма, розрізняють низькотемпературну і високотемпературну плазму. В низькотемпературній плазмі температура близька до температури навколишнього середовища та складає близько $300 \div 400$ К. В високотемпературній плазмі температура може досягати тисяч і сотень тисяч Кельвінів.

Основна властивість плазми – прагнення до електричної нейтральності – є наслідком взаємодії полів окремих заряджених частинок. У плазмі, що є сумішшю заряджених частинок різного знаку, сили притягіння, що діють між різнойменно зарядженими частинками, врівноважуються силами відштовхування однойменно заряджених частинок. Враховуючи статистичний характер розподілу частинок в плазмі, говорять не про повну електричну нейтральність, а про квазінейтральність плазми. Квазінейтральність означає, що сумарний заряд кожної одиниці об'єму плазми $q = n_+ + n_- + n_e \rightarrow 0$.

У нейтральному газі мірою середньої кінетичної енергії хаотичного руху частинок є температура газу T , що визначається з співвідношення $1/2 m w^2 = 3/2 kT$, де m – маса частинок газу, w – середня швидкість їх хаотичного руху, k – стала Больцмана. Таким же чином характеризують і середню енергію частинок плазми.

У цьому випадку середня енергія електронів та іонів може характеризуватися температурою відповідно T_e і T_i :

$$\langle m_e w_e^2 \rangle / 2 = 3 / 2 k T_e ,$$

$$\langle m_i w_i^2 \rangle / 2 = 3 / 2 k T_i$$

У слабких електричних полях і в сталому режимі середні енергії електронної та іонної складових плазми рівні між собою і рівні середній енергії нейтральних частинок, що відповідає $T_e = T_i = T$. Такий стан означає *термодинамічну рівновагу*, і плазму називають *рівноважною*.

У сильних електричних полях енергія, що одержується електронами від поля, виявляється істотно більше енергії іонів через сильні відмінності в швидкостях частинок. Енергія електронів при обмеженому часі взаємодії не встигає вирівнятися з енергією іонів. Тому в такій плазмі $T_e \gg T_i = T$. Такий стан характеризує нерівноважну плазму.

Навіть в нерівноважній плазмі, що утворюється, наприклад, в каналі лідера, через відхилення в розподілі концентрації частинок можуть утворитися області, в яких плазма близька до рівноважної. Такі області називають областями локальної (місцевої) термодинамічної рівноваги.

3.2 Дебаєвський радіус екранування

Як вже сказано вище, основною властивістю плазми є прагнення до електричної нейтральності. Проте в процесі хаотичного руху частинок в плазмі можливо тимчасове відхилення від нейтральності в окремих областях, тобто відбувається тимчасове розділення зарядів в просторі. Так само слід мати на увазі, що в загальному випадку заряди різного знаку розташовані на деякій відстані один від одного.

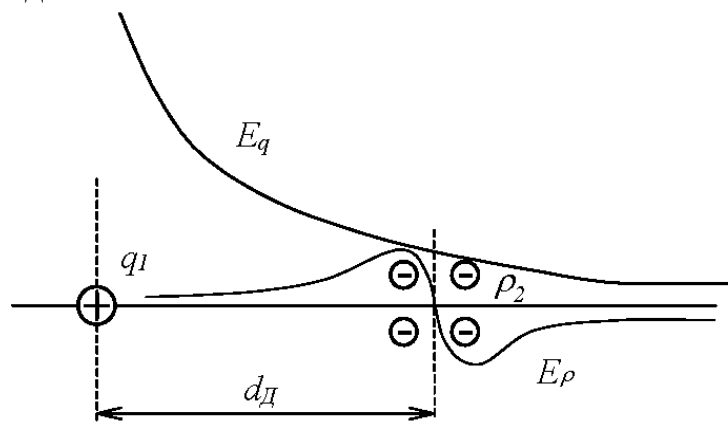


Рис. 3.1 – До поняття про Дебаєвський радіус

Розглянемо елемент структури поля, що складається з деякої зарядженої частинки q_1 і об'ємного заряду ρ_2 , наприклад, іонів протилежного знаку, розташованих на деякій відстані (рис. 3.1). В цілому система нейтральна і на віддаленні поле прагне до нуля. Однак поблизу зарядженої частинки електростатичне поле від цієї частинки переважає. Тільки починаючи з деякої відстані починає проявлятися дія зарядів протилежного знаку, що прагнуть зменшити сумарне поле.

Характерна відстань, на якій перестають проявлятися неоднорідності структури поля квазінейтральної плазми носить назву *Дебаєвського радіуса екранування*.

У рівноважній плазмі, де температури електронної та іонної складових плазми однакові ($T_e=T_i=T$) характерний радіус екранування заряду дорівнює

$$d = \sqrt{kT / 8\pi e^2 n_e}.$$

В нерівноважній плазмі при $T_e \gg T_i = T$

$$d = \sqrt{kT / 4\pi e^2 n_e}.$$

Дебаєвський радіус пов'язаний з відстанню, на якій можливо сильне розділення зарядів в плазмі. Наприклад, при $T = 293\text{K}$ і $n_e = 10^{16} \text{ 1/см}^3$ Дебаєвський радіус $d = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Часто іонізований газ називають плазмою, якщо Дебаєвський радіус екранування багато менше інших характерних відстаней області, зайнятої плазмою.

3.3 Плазма в електричному полі

Вище було розглянуто рух в електричному полі окремих заряджених частинок. На відміну від такого випадку рух заряджених частинок в плазмі в зовнішньому електричному полі істотно ускладнюється, тому що напруженість електричного поля, що діє на кожен окремо взятую частинку, складається з напруженості зовнішнього поля та напруженості полів всіх інших частинок.

Врахувати при аналізі всі ці поля практично неможливо, особливо при наявності зіткнень між частинками, тому переходять до макроскопічного розгляду, заснованого на статистичному осередненні індивідуальних взаємодій полів частинок.

Нехай в повністю іонізованій плазмі, що знаходиться в електричному полі, всі зіткнення частинок носить тільки пружний характер. Рух частинок плазми можна представити як суму спрямованого руху зі швидкістю u і хаотичного руху зі швидкістю w . Якщо через V позначити вектор повної швидкості частинок, то для кожного моменту часу $V = u + w$. Середнє значення швидкості хаотичного руху дорівнює нулю ($\langle w \rangle = 0$), і в зовнішньому полі $\langle V \rangle = \langle u \rangle$. Для однотипних частинок з однаковою масою $\langle v \rangle = u$, так як швидкості u всіх однотипних частинок однакові.

Розрахуємо енергію частинок, які беруть участь в направленому і хаотичному русі. Енергія частинок визначається квадратом швидкості. Середнє значення квадрата повної швидкості

$$\langle V^2 \rangle = \langle (u + w)^2 \rangle = \langle u^2 \rangle + \langle 2u \cdot$$

Так як напрямок швидкості хаотичного руху рівно-ймовірний, то середнє значення виразу $\langle 2u \cdot w \rangle = 0$. Середнє значення повної енергії частинок в плазмі

$$\frac{1}{2} \langle (mV^2) \rangle = \frac{1}{2} (mu^2 + m \langle w^2 \rangle),$$

де $\frac{1}{2} m \langle w^2 \rangle$ – є середня енергія хаотичного руху.

Таким чином накладення зовнішнього електричного поля приводить до збільшення середньої енергії частинок плазми на величину кінетичної енергії руху частинок в цьому полі.

Однією з найважливіших характеристик плазми є електропровідність її електронної компоненти, що визначається як

$$\sigma = en_e \cdot k_e = en_e \cdot \frac{e}{m_e \nu_e} \quad (3.1)$$

де k_e – рухливість електрона, m_e – його маса, n_e – концентрація електронів, ν_e – частота зіткнень.

Для електронів зі швидкістю w

$$\nu_e = w \cdot \sum n_m Q_m + \nu_{eq}, \quad (3.2)$$

де n_m – концентрація нейтральних m -компонентів плазми (атомів, молекул), $Q_m = Q_{em}(w)$ – «транспортний» переріз розсіювання електронів, а ν_{eq} – частота «кулоновських» зіткнень електронів в плазмі

$$\nu_{eq}(w) = 3,52 \frac{\pi e^4}{m_e^{1,65}} \cdot \frac{\ln \Lambda}{(kT_e)^{0,35}} \cdot \frac{n_e}{w^{2,3}} + \frac{4\pi e^4}{m_e^2 w^3} \cdot \ln \Lambda \cdot (n_i - n_e), \quad (3.3)$$

де n_i – концентрація (як позитивно, так і негативно заряджених) іонів в плазмі, а $\ln \Lambda$ – так званий «кулоновський» логарифм $\ln \Lambda \approx \ln \frac{2kT_e d}{e^2}$.

При відсутності негативно заряджених іонів в плазмі $n_i = n_e$, і друга частина формули (3.3) дорівнює нулю.

Для більшості випадків можна вважати, що електропровідність плазми визначається основною (максвелівською) частиною функції розподілення електронів по швидкостям

$$f_e(w) = n_e \left(m_e / 2\pi kT_e \right)^{3/2} \exp(-m_e w^2 / 2kT_e). \quad (3.4)$$

Тоді рухливість електронів

$$k_e = \frac{e}{m_e} \left\langle \frac{1}{\nu_e} \right\rangle \quad (3.5)$$

де $\left\langle \frac{1}{\nu_e} \right\rangle$ відповідає усередненню по максвелівській функції розподілення за виразом:

$$\left\langle \frac{1}{\nu_e} \right\rangle = \frac{\sqrt{2}}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{m_e}{kT_e} \right)^{5/2} \int_0^\infty \frac{1}{\nu_e(w)} \cdot w^4 \cdot \exp\left(-\frac{m_e w^2}{2kT_e}\right) dw. \quad (3.6)$$

Для нерівноважної плазми в (3.2) ступінь іонізації, як правило, є незначною. Тоді можна нехтувати «кулоновськими» зіткненнями електронів.

У довідниковій літературі звичайно наводять залежності Q_m не від швидкості w , а від енергії електронів ε , виражених в [eV].

В цьому випадку швидкість електрона можна знаходити за виразом

$$w = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^{-19} \varepsilon}{m_e}}, \text{ а частоту зіткнень: } \nu_e(\varepsilon) = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^{-19}}{m_e}} \cdot \sum n_m Q_{em}(\varepsilon).$$

З урахуванням цього вираз (3.6) перетвориться до виду:

$$\left\langle \frac{1}{v_e} \right\rangle = 1,393 \cdot 10^{-38} \frac{\sqrt{m_e}}{(kT_e)^{5/2}} \int_0^\infty \frac{\varepsilon}{\sum n_m Q_{em}(\varepsilon)} \cdot \exp\left(-\frac{11600 \varepsilon}{T_e}\right) \cdot d\varepsilon. \quad (3.7)$$

ТЕМА 4 КОРОННИЙ РОЗРЯД

Лекція №4 Електрон-іонні процеси в коронному розряді

Коронний розряд займає особливе місце, оскільки саме коронний розряд використовується в переважній більшості технологій, які отримали сьогодні широке промислове використання.

4.1 Форми коронного розряду

Коронний розряд – це характерна форма самостійного газового розряду, що виникає в різко-неоднорідних полях. Головною особливістю цього розряду є те, що іонізаційні процеси електронами відбуваються не по всій довжині проміжку, а тільки в невеликій його частині поблизу електрода з малим радіусом кривизни (так званого коронуючого електрода). Ця зона характеризується значно вищими значеннями напруженості поля в порівнянні з середніми значеннями для всього проміжку. Сама назва «коронний» розряд отримала через своє світіння, що спостерігається на тонких проводах і нагадує сонячну корону.

Основними формами коронного розряду є лавинна і стримерна. Назви цих форм обумовлені основними характерними процесами, що мають місце в зоні іонізації відповідних коронних розрядів. Візуально лавинна корона спостерігається у вигляді відносно тонкого шару, що світиться, на гладких електродах і у вигляді дискретних світних плям на негладких (шорсткуватих) електродах. Стримерна корона спостерігається у вигляді слабкого світіння ниткоподібних каналів, довжина яких в залежності від конкретних умов може змінюватися в широких межах (від декількох міліметрів до декількох сантиметрів).

Частина проміжку, де відбуваються іонізаційні процеси, називається чохлом коронного розряду, а решта проміжку, де відбувається дрейф заряджених частинок, є зоною дрейфу. Якщо в зоні дрейфу існують заряди тільки одного знаку, то корону називають *уніполярною*, а якщо заряди обох знаків, то *біполярною*.

Біполярна корона постійного струму виникає тоді, коли є проміжок з двома коронуючими електродами (наприклад, проміжок провід-провід або голка-голка), до якого прикладено постійну напругу. Уніполярна корона існує там, де є проміжок тільки з одним коронуючим електродом або з кількома коронуючими електродами з однаковою полярністю живлячої напруги.

Процеси в чохлі та в зоні дрейфу біполярної корони набагато складніші, ніж в уніполярній короні, т.к. з'являється додатковий механізм іонної рекомбінації в об'ємі проміжку і додаткові механізми вторинних процесів на електродах, що істотно ускладнює математичний опис та моделювання цього виду розряду.

Лавинна форма коронного розряду може реалізовуватися у вигляді безперервної і спалахуючої корони. Спалахуючий характер корони пов'язаний з тим, що рухливість електронів та іонів розрізняється на три порядки. В результаті при позитивній полярності коронуючого електрода електрони швидко йдуть на анод, а позитивні іони, дрейфуючи від анода, виявляються в області слабого поля і не можуть через низьку рухливість швидко піти від анода. Тому напруженість поля у анода знижується і іонізація практично припиняється. Наступний лавинний спалах може виникнути тільки після того, як позитивні іони покинуть зону іонізації. При позитивній полярності коронуючого електрода спалахуюча корона виникає як в електронегативних, так і в електропозитивних газах.

При негативній полярності напруги живлення спалахуючий характер розряду виникає тільки в електронегативних газах, де електрони потрапляючи в область слабого поля, прилипають до молекул утворюючи мало рухливі іони, а ті в свою чергу знижують напруженість поля в зоні іонізації. Ці спалахові імпульси отримали назву імпульсів Трічела.

4.2 Уніполярний коронний розряд

Основну частину проміжку між електродами при уніполярному коронному розряді займає зона дрейфу (зовнішня зона коронного розряду), в якій рухаються іони тільки одного знаку. Чохол коронного розряду, в якому зосереджені іонізаційні процеси, відіграє роль постачальника іонів для зовнішньої зони.

У технологічних процесах головну роль грає зовнішня зона коронного розряду. Як область поля з уніполярним об'ємним зарядом вона характеризується певним розподілом напруженості поля E і густини об'ємного заряду ρ .

Система рівнянь поля для зовнішньої зони коронного розряду має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{E} = \rho / \epsilon_0, & (4.1) \\ \vec{E} = -\nabla \varphi, & (4.2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{J} = k \vec{E}, & (4.3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{J} = \rho \cdot n \vec{E}, & (4.4) \end{cases}$$

Перше рівняння – рівняння Пуассона – являє собою запис теореми Гауса в диференціальній формі і встановлює зв'язок між густиною об'ємного заряду ρ і напруженістю поля E . Друге рівняння – відомий вираз напруженості поля через потенціал φ . Далі слідує рівняння нерозривності густини струму. Четверте рівняння відображає зв'язок густини струму J з густиною об'ємного заряду ρ , напруженістю поля E і рухливістю іонів k .

Для вирішення даної системи рівнянь має бути визначено три граничних умови. Ними є задані значення потенціалів електродів: коронуючого – $\varphi_1 = U$ і некоронуючого – $\varphi_2 = 0$. Третя гранична умова формулюється таким чином –

похідна потенціалу біля поверхні коронуючого електрода дорівнює початковій напруженості незалежно від інтенсивності коронного розряду:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right)_{r=r_0} = -E_0.$$

Остання гранична умова відповідає розрахунковій схемі, коли зона іонізації у коронуючого електрода до уваги не приймається і іони умовно вводяться в проміжок безпосередньо з поверхні коронуючого електрода. Кількість прибуваючих іонів регулюється тим, що напруженість на поверхні коронуючого електрода повинна підтримуватися на рівні початкової.

Якісне фізичне обґрунтування граничної умови полягає в наступному. Якщо припустити, що напруженість поля біля поверхні коронуючого електрода перевершує E_0 , то це призводить до різкого зростання інтенсивності іонізації і збільшення об'ємного заряду, впроваджуваного в проміжок. Зростання об'ємного заряду в проміжку призводить до зменшення напруженості поля біля коронуючого електрода. Таким чином, подібний негативний зворотній зв'язок стабілізує напруженість біля коронуючого електрода на рівні початкової напруженості.

Безпосередні експериментальні вимірювання напруженості поля біля поверхні коронуючого електрода підтверджують, що вона приблизно відповідає початковій. Нарешті, доводом на користь правомірності такого припущення є збіг розрахованих на його основі і експериментальних розподілів поля для найпростіших систем електродів.

Рішення системи рівнянь (4.1) – (4.4) для конкретної системи електродів, використаної в технічній установці, визначає розподіл напруженості поля E і густини об'ємного заряду ρ в робочому об'ємі цієї установки.

В систему рівнянь як параметр входить рухливість іонів k . Рухливість іонів визначається як швидкість руху іонів у полі одиничної напруженості і залежить від часу існування іонів. З плином часу рухливість іонів зменшується за рахунок збільшення еквівалентної маси іонів в результаті приєднання нейтральних молекул до первинного іону чи електрону.

У діапазоні часів до 0,5 мс рухливості позитивних і негативних іонів в повітрі постійні і складають $k_+ = 2,1 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $k_- = 2,24 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Старіння іонів позначається при $t > 0,5 \text{ мс}$, але і в цьому випадку можна користуватися деякою середньою величиною.

Найпростішими, але широко використовуваними в технологічних установках електродами є коаксіальні циліндри. Ця система складається з заземленого циліндричного електрода радіуса R , по осі якого розташовується коронуючий електрод – дріт радіуса r_0 .

Використовуються також інші системи електродів, такі як «ряд проводів між заземленими площинами», системи з коронуючими електродами у вигляді голок і т.д. Тільки для системи «коаксіальні циліндри» система рівнянь (4.1) – (4.4) має аналітичне рішення, тому що задача є одномірною.

Характеристики коронного розряду між коаксіальними циліндрами.

Коаксіальні циліндри є найпростішою системою електродів, для якої рівняння (4.1) – (4.4) можуть бути проінтегровані аналітично.

Беручи до уваги, що в циліндричних координатах напруженість поля залежить тільки від поточного радіуса, рівняння (4.1) можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(rE) = \rho / \varepsilon_0. \quad (4.5)$$

Позначивши через A струм коронного розряду на одиницю довжини електрода, рівняння нерозривності (4.3) можна представити у вигляді:

$$A = 2\pi rJ.$$

Звідси, використовуючи (4.4), можна отримати:

$$\rho = A / 2\pi rkE. \quad (4.6)$$

Після підстановки (4.6) в (4.5) останнє перетворюється на рівняння з відокремлюваними змінними, яке легко інтегрується:

$$\int_{r_0 E_0}^{rE} rEd(rE) = \frac{A}{2\pi\varepsilon_0 k} \int_{r_0}^r r dr.$$

Таким чином,

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi\varepsilon_0 k} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) + \left(\frac{E_0 r_0}{r}\right)^2}. \quad (4.7)$$

При $r \gg r_0$

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi\varepsilon_0 k} + \left(\frac{E_0 r_0}{r}\right)^2}. \quad (4.8)$$

Для інтенсивного коронного розряду, коли $U \gg U_0$ (U_0 – початкова напруга), другий доданок в (4.8) істотно менше першого, і, отже,

$$E = \sqrt{\frac{A}{2\pi\varepsilon_0 k}}. \quad (4.9)$$

З (4.8) і (4.9) випливає, що напруженість поля в значній частині проміжку між коаксіальними циліндрами постійна (рис. 4.1). Відповідно до (4.6) густина об'ємного заряду змінюється по гіперболі.

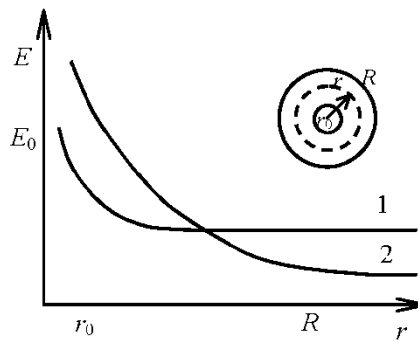


Рис. 4.1 – Розподілення електростатичного поля (2) і поля при уніполярному коронному розряді (1) між коаксіальними циліндрами

Різниця в розподіленнях електростатичного поля і поля при коронному розряді обумовлено дією об'ємного заряду, зосередженого в проміжку. Для визначення вольт-амперної характеристики коронного розряду $A=f(U)$ використовується умова:

$$\int_{r_0}^R E dr = U.$$

При підстановці цього рівняння в рівняння (4.7) і його інтегрування після спрощень одержуємо рівняння вольт-амперної характеристики, яке записується в узагальненому вигляді:

$$I = kGU(U - U_0), \quad (4.10)$$

$$\text{де } G = \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \left(1 + 2,75 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{R}{r_0}}\right).$$

Для інших систем електродів використовуються наближені методи, наприклад, метод Дейча-Попкова. Приклад розподілення напруженості поля при коронному розряді для системи «провід-площина» представлений на рис. 4.2.

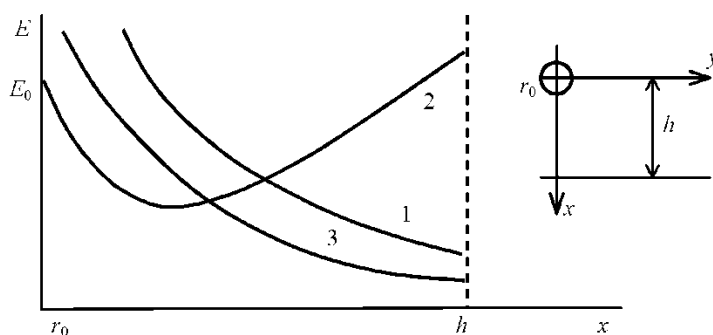


Рис. 4.2 – Розподілення напруженості поля (1 – електричного, 2 – при коронному розряді) і густини об'ємного заряду (3)

На відміну від «коаксіальних циліндрів» при коронному розряді напруженість поля зростає в напрямку до площини, а не залишається постійною. Таке розподілення поля характерне і для інших систем електродів з циліндричними коронуючими електродами. Вольт-амперна характеристика і для інших систем електродів може бути представлена у вигляді (4.10), але коефіцієнт G в цьому випадку має свій вигляд.

Початкові і пробивні напруги проміжків при коронному розряді. Початкова напруга або початкова напруженість поля коронного розряду, є важливим параметром, який необхідно знати при виборі тієї або іншої системи електродів стосовно конкретної технологічної установки. Перевищення напруги над початковою визначає інтенсивність коронного розряду, а значить рівень необхідних робочих напруг електротехнологічної установки. На практиці зручно визначати початкову напруженість проміжку між коаксіальними циліндрами за емпіричною формулою Піка:

$$E_0 = 30,3\delta \left(1 + \frac{0,298}{\sqrt{r_0\delta}}\right),$$

де δ – відносна густина повітря, а початкова напруга з виразу:

$$U_0 = E_0 r_0 \ln \frac{R}{r_0}.$$

Початкова напруга при позитивній полярності електрода дещо більше, ніж при негативній полярності. Пояснюється це тим, що при розвитку розряду з негативного електрода коефіцієнт вторинної іонізації γ більше, ніж при

позитивній полярності електрода, оскільки в цьому випадку його значення визначають не тільки фотоіонізації в об'ємі, але ще й фотоіонізації на електроді.

Пробивні напруги проміжків між електродами при коронному розряді визначають граничні напруженості поля, при яких ще можуть працювати технологічні установки, що використовують коронний розряд.

Пробій коронуючого проміжку відбувається при напрузі, більшій початкової (рис. 4.3). Якщо розрядний проміжок несиметричний, тобто його електроди мають різні радіуси кривизни, то пробивна напруга залежить від полярності електрода з меншим радіусом кривизни: при негативній полярності вона істотно вище, ніж при позитивній полярності (рис. 4.4). Пояснюється це тим, що при позитивній полярності рухливі електрони легко йдуть із зони розряду на електрод, а позитивний об'ємний заряд, що залишився в проміжку, посилює напруженість поля в зовнішній частині проміжку, сприяючи подальшому розвитку розряду. При негативній полярності напруги живлення, навпаки, малорухливий позитивний об'ємний заряд зменшує напруженість поля в зовнішній частині проміжку, і для розвитку розряду потрібно значно більша напруга.

Середні розрядні градієнти напруги при позитивній полярності стрижня становлять 4,5 кВ/см, а при негативній приблизно 10 кВ/см. Ці значення, в свою чергу, приблизно в 3 – 5 рази менше ніж в однорідному полі (24,5 ÷ 30 кВ/см).

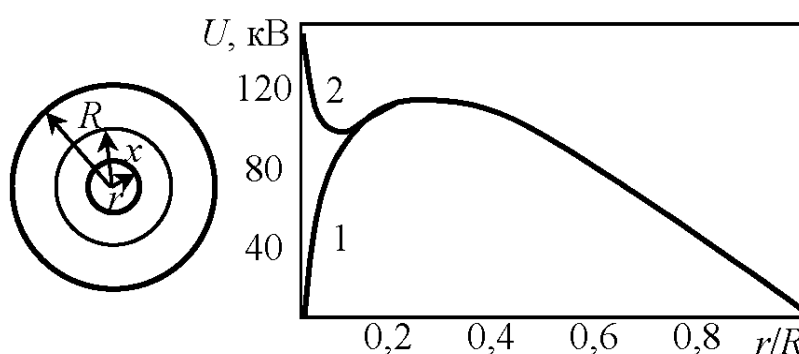


Рис. 4.3 – Розрядні (2) і початкові (1) напруги повітряного проміжку між коаксіальними циліндрами ($R = 10$ см)

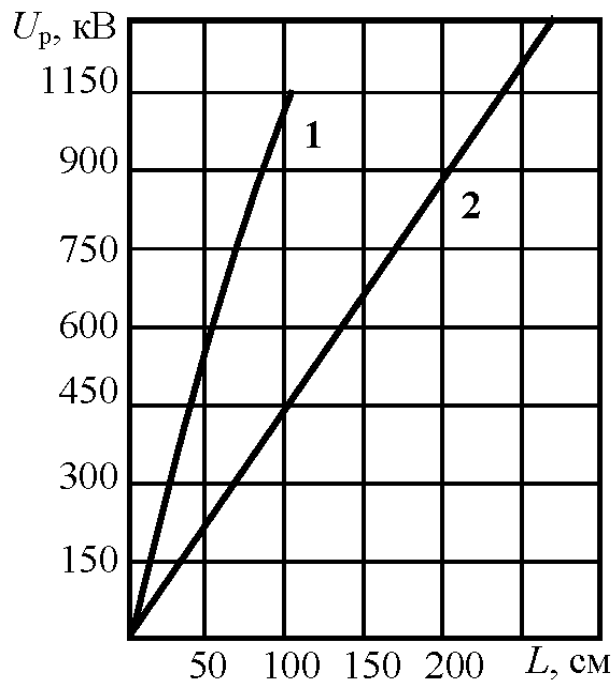


Рис. 4.4 – Розрядні напруги повітряних проміжків стрижень-площина при негативній (1) і позитивній (2) полярностях постійної напруги живлення стрижня

ТЕМА 5 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ЗАСНОВАНІ НА СИЛОВОМУ ВПЛИВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ НА МАТЕРІАЛИ

Лекція №5 Процеси електричного зарядження частинок матеріалів

5.1 Вступ

Якщо часткам дрібно-дробленого (диспергованного) матеріалу повідомлений деякий заряд, то на ці частинки в електричному полі діє сила $F = Eq$, яка змушує частинки рухатися. Різні форми цього руху можна використовувати для виконання різноманітних технологічних операцій. Широке поширення технологій, заснованих на управлінні рухом заряджених частинок полем, пов'язано з наявністю цілого ряду переваг цих технологій перед традиційними методами впливу на оброблюваний матеріал.

- Перш за все, слід вказати на безпосередній вплив електричної енергії, зосередженої в електричному полі, на оброблюваний матеріал без проміжних трансформацій енергії, а значить і без додаткових втрат, які супроводжують ці проміжні трансформації.

- У природі немає речовин як провідних або напівпровідних, так і діелектричних, які тим чи іншим способом не могли б бути заряджені і піддані силовому впливу електричного поля. Звідси випливає властивість універсальності методів розглянутої технології.

- Ця універсальність не обмежується скільки-небудь значно тією обставиною, що найбільш ефективний вплив електричних полів на сировину

може проявлятися у випадку, якщо остання знаходиться в диспергованому стані, тому що взаємодія поля з речовиною відбувається головним чином на межі розділу середовищ. Слід мати на увазі, що величезна маса сировини по своїй природі або вже перебуває в диспергованому стані, або легко може бути приведена в такий стан при видобутку і подальшій обробці. Наприклад, видобуток корисних копалин неминуче супроводжується істотним подрібненням руд. Ступінь роздробленості може бути різною: від часток субмікронних розмірів до часток у кілька десятків міліметрів.

- Дані методи дозволяють забезпечити легке і універсальне управління процесами за рахунок можливості плавного регулювання в широких межах величини напруги (або що теж саме напруженості електричного поля). Остання обставина дозволяє говорити про можливість забезпечення високої точності.

Силовий вплив електричного поля на частинки сировини може реалізовуватися в різних формах і мати різний кінцевий результат:

1. Частинки речовини при розміщенні їх в електричному полі поляризуються. Якщо вони довгастої форми, то виникають сили, що орієнтують частинки по силових лініях поля. Ця здатність лежить в основі технологій виготовлення текстильних і композиційних матеріалів.

2. Так як властивості окремих частинок відрізняються, то виникають сили, які крім орієнтації змушують частинки рухатися з різними швидкостями і по різних траєкторіях. Це дозволяє здійснювати сепарацію і класифікацію частинок по діелектричним властивостям, електропровідності і розмірами.

3. При наявності надлишкового електричного заряду частинки незалежно від фізичних властивостей будуть рухатися в електричному полі в напрямку до електродів, які мають заряд протилежний за знаком заряду частинок. Це дозволяє виділяти частинки з несучого їх газового середовища, тобто здійснювати очищення газу від рідких і твердих диспергованих матеріалів.

4. Частинки, осідаючи на електрод, утримуються на його поверхні за рахунок сил дзеркального відображення, створюючи щільний шар. При цьому маючи однойменний заряд, частинки розштовхуються і забезпечують рівномірність покриття, що використовується при нанесенні полімерних порошкових покриттів в електричному полі для декоративних і антикорозійних цілей.

5. Взаємодія зарядів, осаджених на поверхню фото-напівпровідника, з зарядженими частинками проявляючих матеріалів приводить до їх вибіркового осадження. Це явище було покладено в основу електродруку.

6. Зарядження частинок диспергованих матеріалів різнойменними зарядами дозволяє зробити однорідне змішування матеріалів.

Всі ці електротехнологічні процеси містять три основні стадії, які і визначають структурну схему типової технологічної установки (рис. 5.1).

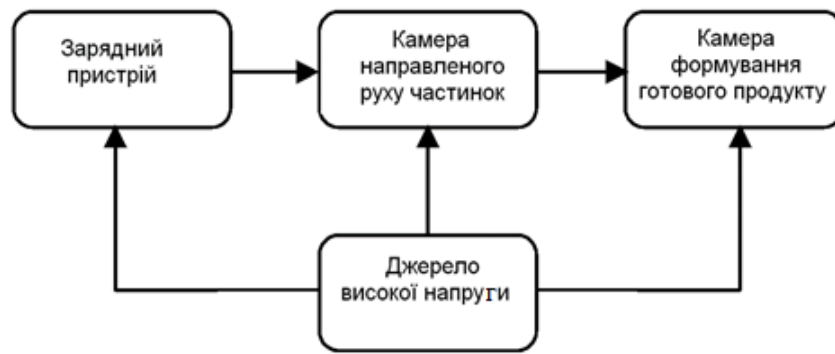


Рис. 5.1 – Структурна схема типової електротехнологічної установки

Відповідно до цієї схеми теоретичну основу процесів становлять закономірності зарядження і руху частинок в електричному полі.

5.2 Зарядження частинок

В даний час використовуються такі методи зарядження частинок, тобто надання частинкам надлишкового заряду: 1) іонне зарядження, 2) індукційне зарядження, 3) статична електризація.

5.2.1 Іонне зарядження

Метод полягає в тому, що іони, що рухаються в газовому середовищі, наприклад, у зовнішній зоні коронного розряду, і стикаються з частинкою, осідають на її поверхні. Зворотно іони не можуть повернутися з-за того, що вони повинні володіти певною енергією для подолання потенційного бар'єру на межі розділу середовищ. Таким чином відбувається накопичення іонів на частинці.

Розглянемо зарядження частинки в електричному полі з уніполярним об'ємним зарядом. Збільшення заряду частинки визначається кількістю іонів, що потрапляють на частинку в одиницю часу:

$$\frac{dq}{dt} = e \int_s \bar{f} d\bar{s}, \quad (5.1)$$

де q – заряд частинки; e – заряд електрона; \bar{f} – вектор густини потоку іонів; s – площа поверхні частинки, на яку осідають іони.

Потік іонів на частинку визначається рухом іонів під дією електричного поля і рухом, викликаним дифузією іонів за рахунок градієнта концентрації іонів:

$$\bar{f} = nk\bar{E} - D\overline{gradn}, \quad (5.2)$$

де E – напруженість електричного поля біля поверхні частинки; n, k – концентрація і рухливість іонів; D – коефіцієнт дифузії.

Визначимо, при яких умовах переважає зарядження частинки за рахунок осадження іонів під дією електричного поля («ударне» зарядження) і коли переважає рух іонів під дією дифузійного механізму («дифузійне» зарядження). З виразу (5.2.) випливає, що «дифузійний» механізм переважає над «ударним» за умови, якщо $Dgradn \gg$ Припускаючи, що у поверхні частинки $n=0$, а її вплив виводу із рівноваги на концентрацію іонів поширюється на відстань,

рівну $2a$, отримуємо $\text{grad}n \sim$ При атмосферному тиску відповідно до молекулярно-кінетичної теорії газів $D \sim 0,025$ к. Тому можна записати $E \ll 0,025/(2a)$. Для умов, які спостерігаються в апаратах електронно-іонної технології, коли $E \sim (1 \div 3)$ кВ/см, отримуємо, що при розмірах частинок $2a \ll 0,1$ мкм переважає «дифузійний» механізм зарядження частинок. «Ударне» зарядження переважає в цих умовах для частинок розміром $2a \gg 1$ мкм.

«Ударне» зарядження частинок в електричному полі.

Результуюча напруженість поля біля поверхні частинки визначається такими складовими: зовнішнім полем $E_{\text{зовн}}$, полем поляризації частинки $E_{\text{п}}$, полем заряду іонів, які осіли на частинку, E_q , полем дзеркального відображення іона в поверхні частинки $E_{\text{дз}}$:

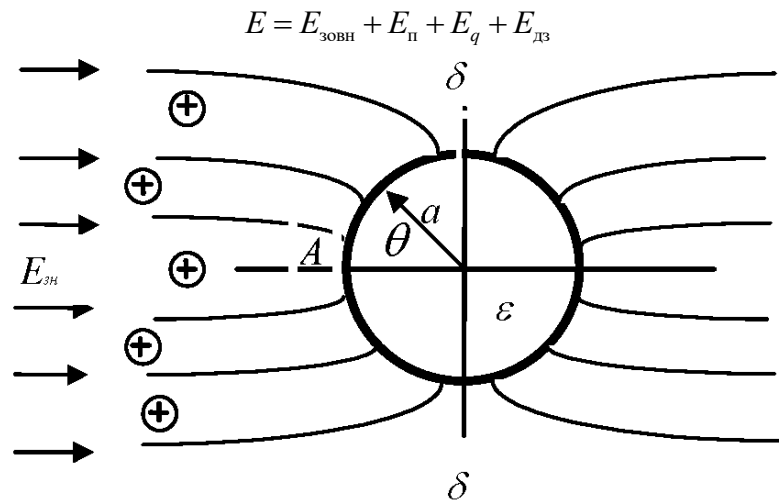


Рис. 5.2 – Схема ударного зарядження сферичної частинки

Для сферичної частинки (рис. 5.2) радіусом a й відносною діелектричною проникністю ε в повітрі нормальна складова зовнішнього поля з урахуванням поля поляризації частинки (позитивний напрям – до частинки) дорівнює:

$$E_{\text{зн.п}} + E_{\text{п.п}} = E_{\text{зн}} \cos \theta + \frac{2(\varepsilon - 1)}{\varepsilon + 2} E_{\text{зн}} \cos \theta = E_{\text{зн}} k_{\varepsilon} \cos \theta \quad (5.4)$$

де θ – меридіональний кут сферичної системи координат, $k_{\varepsilon} = 1 + 2(\varepsilon - 1)/(\varepsilon + 2) = 3\varepsilon/(\varepsilon + 2)$ – коефіцієнт, що враховує відносну діелектричну проникність частинки.

Напруженість кулонівського поля від заряду частинки, відштовхуючого підлітаючі іони, дорівнює:

$$E_q = \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 a^2}. \quad (5.5)$$

Поле дзеркального відображення іона діє на малій відстані від поверхні частинки, і його можна врахувати як збільшення ефективного радіусу частинки, оскільки всі іони, що потрапили в межі зони дії сили дзеркального відображення, захоплюються частинкою. Для розглянутих розмірів частинок цим збільшенням можна знехтувати.

Підставляючи значення напруженостей електричного поля в вирази (5.2) і (5.1), отримаємо:

$$\frac{dq}{dt} = ek \int \left(nk_{\varepsilon} E_{\text{зн}} \cos \theta \frac{-q}{4\pi\varepsilon_0 a^2} \right) ds. \quad (5.6)$$

Чисельні розрахунки показують, що концентрація іонів при русі в електричному полі в зазначених умовах не змінюється вздовж траєкторії руху іонів. Якщо на достатньому віддаленні від частинки ця концентрація дорівнює n_0 , то вона складає n_0 і вздовж поверхні частинки. Отже, вона може бути винесена за знак інтеграла у формулі (5.6). Інтегрування в (5.6) проводиться у сферичній системі координат з тієї сторони поверхні частинки, де поле забезпечує потрапляння іона на частинку. Отже:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{en_0 k}{4\varepsilon_0 q_m} [q(t) - q_m]^2, \quad (5.7)$$

де $q_m = 4\pi\varepsilon_0 k_{\varepsilon} a^2 E_{\text{зн}}$ – максимальний заряд частинки.

Очевидно, що на самому початку зарядження частинки ($q = 0$) іони осідають на всій лівій половині частинки (границя δ - δ). У міру накопичення заряду на частинці, завдяки посиленню відштовхуючого поля область осадження іонів скорочується (границя δ - δ зміщується вліво) аж до нуля (границя δ - δ проходить через точку A). В цьому випадку зарядження частинки припиняється і частинка набуває максимальний заряд.

Рішенням диференціального рівняння (5.7) є вираз (формула Потеньє):

$$q(t) = q_m \frac{en_0 kt}{4\varepsilon_0 + en_0 kt}, \quad (5.8)$$

Для провідної частинки можна вважати, що $\varepsilon \rightarrow \infty$ і $k_{\varepsilon} = 3$, тоді:

$$q_m = 12\pi\varepsilon_0 a^2 E_{\text{зн}}. \quad (5.9)$$

При зарядженні частинки в біполярній короні, коли в просторі, що оточує частинку, поряд з іонами одного знаку (наприклад, позитивними – n_+ , k_+) присутні іони іншого знаку (негативні – n_- , k_-), потік зарядів на частинку має дві складові: позитивну, збільшує заряд частинки, і негативну, зменшує її заряд.

Граничний заряд в цьому випадку дорівнює:

$$q_{\text{гран}} = q_m \frac{1 - \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}{1 + \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}, \quad (5.10)$$

де $\gamma_{v+} = en_+ k_+$ і $\gamma_{v-} = en_- k_-$ – провідності, що визначаються відповідно позитивними і негативними зарядами. З формули (5.10) видно, що граничний заряд, що набуває частинка в полі біполярного коронного розряду, менше максимального заряду частинки, одержуваного при уніполярній зарядці $q_{\text{гран}} < q_m$.

«Дифузійне» зарядження частинок.

Для малих частинок ($2a \ll 0,1$ мкм) потік іонів на частинку визначається тільки процесом дифузії, а з електричних сил необхідно враховувати лише

відштовхуючий вплив, що набуває заряд частинки. Тоді загальний потік іонів на частинку буде дорівнювати:

$$\Phi = \oint \left(\frac{q}{\pi \varepsilon_0 a^2} \right) ds. \quad (5.11)$$

За позитивний напрям прийнято напрямок потоку до центру частинки. Підстановка в (5.1) і інтегрування рівняння дає рішення в неявному вигляді:

$$t = \frac{\varepsilon_0}{en_0 k} [E_i(A) - c_0 - \ln A], \quad (5.12)$$

де E_i – інтегральна показова функція; $A = kq / (D4\pi\varepsilon_0 a)$; $c_0 = 0,577$ – стала Ейлера.

Визначивши величину A з (5.12) легко можна знайти заряд q . При дифузійному механізмі зарядження заряд зростає в часі необмежено.

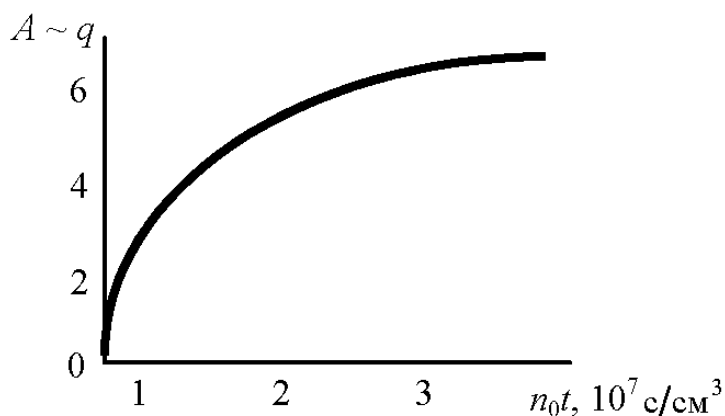


Рис. 5.3 – Залежність параметра A від часу

Пояснюється це тим, що в міру накопичення заряду на частинці і зростання його відштовхуючої дії зростає градієнт концентрації іонів біля поверхні частинки за рахунок зосередження зміни концентрації все в більш вузькому шарі поблизу поверхні частинки. Однак графік (рис. 5.3) показує, що основний заряд частинка набуває в початковий період часу ($n_0 t \leq 2 \cdot 10^7$ с/см³), а далі він змінюється мало. За граничний заряд приймається $A_{\text{гран}} = 6,7$ при $n_0 t = 4 \cdot 10^7$ с/см³.

Строго аналітичного рішення задачі при одночасному врахуванні «ударного» і «дифузійного» механізмів зарядження немає і завдання вирішується чисельно. В результаті чисельних розрахунків встановлено, що при $0,1 \leq a \leq 1$ мкм величину заряду можна обчислювати як суму зарядів, розрахованих за формулами «ударного» і «дифузійного» зарядження.

Якщо форма частинок істотно відрізняється від сферичної, то використовується заміна частинки на частинку еліпсоїдальної форми, еквівалентну за співвідношенням осей і об'єму. Слід мати на увазі, що якщо форма частинки близька до сферичної, то вона при зарядженні обертається.

Частинки подовженої форми в електричному полі набувають певну орієнтацію, і цю обставину слід враховувати при розрахунку величини заряду. Формули для «ударного» і «дифузійного» зарядження еліпсоїдів можна знайти у відповідній літературі.

5.2.2 Індукційне зарядження частинок

Механізм індукційного зарядження пояснимо, розглядаючи рух сферичної провідної частинки в полі плоского конденсатора (рис. 5.4).

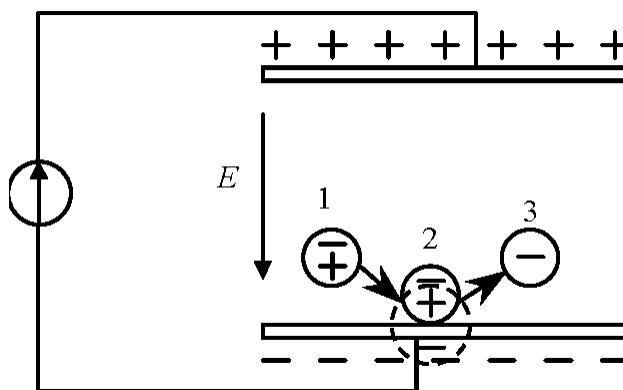


Рис. 5.4 – Схема індукційного зарядження частинок

Частинка, яка потрапляє в проміжок між пластинами, поляризується (позиція 1). При контакті з електродом (позиція 2) взаємодія зарядів частинки і електрода призводить до нейтралізації найближчого до точки контакту поляризаційного заряду. Далі, якщо частинка відривається (позиція 3), то вона забирає надлишковий заряд.

Таким чином, індукційний механізм зарядження включає поляризацію частинки в електричному полі і нейтралізацію одного із зарядів. Не обов'язково це відбувається при контакті з електродом. Наприклад, поділ зарядів відбувається при розриві крапель в електричному полі.

Зарядження при контакті з електродом в електричному полі.

Для розрахунку індукційного зарядження розглянемо частинку у вигляді провідного півеліпсоїда, що знаходиться на поверхні плоского електрода в електричному полі (рис. 5.5, $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$, питомі електропровідності $\gamma_{v1} = \gamma_{v2} = 0$).

Півеліпсоїд за рахунок зміни співвідношення осей дозволяє моделювати частинки різної форми. Форма у вигляді півеліпсоїда зручна для розрахунку поля, так як за рахунок дзеркального відображення плоскої поверхні електрода від системи півеліпсоїда на площині в однорідному полі можна перейти до системи еліпсоїд в однорідному полі. Для такого випадку відомий аналітичний розподіл поля на поверхні і навколо еліпсоїда, що знаходиться в однорідному полі.

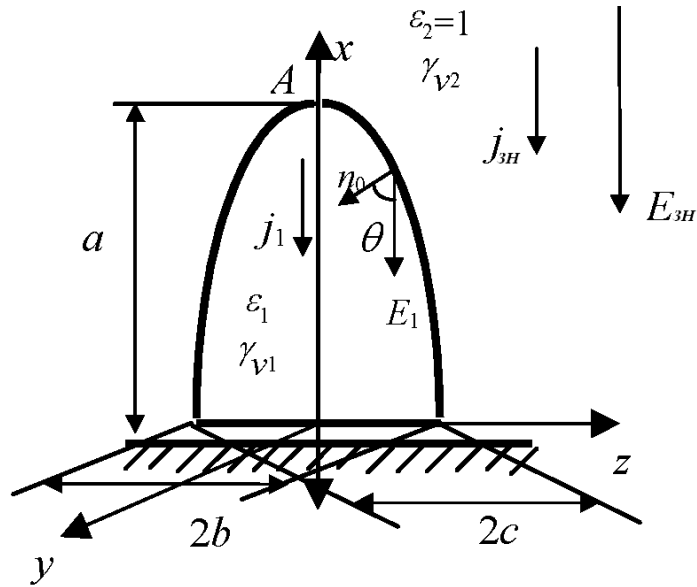


Рис. 5.5 – Півеліпсоїд на електроді

Тоді напруженість електричного поля біля поверхні провідного півеліпсоїда E_n запишеться у вигляді:

$$E_n = -\frac{E_{3H}x}{a^2 d_a} \left[\left(\frac{x}{a} \right)^2 + \left(\frac{y}{b} \right)^2 + \left(\frac{z}{c} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (5.13)$$

де a, b, c – півосі еліпсоїда, d_a – коефіцієнт деполяризації еліпсоїда в напрямку вісі x .

Коефіцієнт деполяризації відображає зміну напруженості поля еліпсоїдом в напрямку відповідної вісі. Для сфери маємо $d_a = d_b = d_c = 1/3$. Якщо частинка моделюється півеліпсоїдом, то $b/a = c/a = 0,5$ і $d_a = 0,172$.

Маючи на увазі, що густина поверхневого заряду пов'язана з напруженістю поля біля поверхні електрода співвідношенням:

$$\sigma = -\varepsilon_0 E_n, \quad (5.14)$$

індукційний заряд півеліпсоїда можна визначити за формулою:

$$q = \int_s \sigma ds = -\varepsilon_0 \int_s E_n ds. \quad (5.15)$$

Після підстановки (5.13) в (5.15) і інтегрування в еліпсоїдальній системі координат по зовнішній поверхні півеліпсоїда отримаємо:

$$q = -\pi \varepsilon_0 E_{3H} \frac{bc}{d_a} \quad (5.16)$$

Таким чином, провідна частинка на поверхні електрода в електричному полі, вектор напруженості якого спрямований до поверхні електрода, набуває негативний заряд і на неї діє відриваюча від поверхні електрична сила.

Зарядження напівпровідної частинки, що знаходиться на електроді в полі уніполярного коронного розряду.

У загальному випадку частинка характеризується деякою певною величиною питомої об'ємної електропровідності γ_{v1} і знаходиться на електроді не в електростатичному полі, а в полі уніполярного коронного розряду, тобто $\gamma_{v2} \neq 0$ і $J_{3H} \neq 0$. Тоді зарядження не проходить миттєво і зміна заряду в часі

визначається рівнянням нерозривності густині повного струму (струму провідності та зміщення) на поверхні частинки (рис. 5.5):

$$\gamma_{v2}E_{2n} + \varepsilon_0\varepsilon_2 \frac{dE_{2n}}{dt} = \gamma_{v1}E_{1n} + \varepsilon_0\varepsilon_1 \frac{dE_{1n}}{dt}. \quad (5.17)$$

Оскільки в початковий момент часу частинка поляризується як діелектричний еліпсоїд, то поле всередині частинки є однорідним і направлено паралельно E_{3n} . Це означає, що $E_{1n} \sim \cos\theta$, де θ – кут між нормаллю до поверхні і вектором E_1 . Звідси з умови рівності нормальних складових вектора електричного зміщення всередині і зовні напівеліпсоїда отримуємо:

$$E_{2n} = E_{1n} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \sim$$

де E_{2n} – нормальна складова напруженості електричного поля на зовнішній поверхні півеліпсоїда. Тоді густина зв'язаних зарядів $\sigma_{\text{пов}} = \varepsilon_0(E_{1n} - E_{2n}) \sim \theta$

Кількість заряду, що осідає в одиницю часу на одиницю поверхні частинки в результаті протікання струму коронного розряду дорівнює:

$$J_{2n} - J_{1n} = \gamma_{v2}E_{2n} - \gamma_{v1}E_{1n} \sim$$

Таким чином, сумарна густина вільного та зв'язаного зарядів $\sigma = \sigma_A \cos\theta$ (пропорційна $\cos\theta$), де σ_A – сумарна густина вільного та зв'язаного зарядів у вершині A півеліпсоїда.

Оскільки в процесі зарядження E_{1n} , E_{2n} , σ залишаються пропорційними $\cos\theta$, то рівняння нерозривності (5.17) досить вирішити тільки для вершини еліпсоїда A .

Для вершини еліпсоїда справедливо:

$$E_{1n}^A = E_{3n} + d_a \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0}; \quad E_{2n}^A = E_{3n} - (1 - d_a) \frac{\sigma_A}{\varepsilon_0}. \quad (5.18)$$

Підставляючи (5.18) в (5.17) і інтегруючи по поверхні частинки, отримаємо:

$$q(t) = q_\infty \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (5.19)$$

$$q_\infty = \frac{\pi\varepsilon_0 bc E_{3n} (\varepsilon_1 \gamma_{v2} - \gamma_{v1})}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)}$$

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 d_a + 1 - d_a}{\gamma_{v1} d_a + \gamma_{v2} (1 - d_a)}$$

де q_∞ – граничний заряд, що набувається частинкою, τ – постійна часу зарядження частинки.

З отриманих залежностей випливає, що зарядження частинки в часі носить експоненціальний характер.

При $\varepsilon_1 \gamma_{v2} > \gamma_{v1}$ (частинка погано проводить) $q_\infty > 0$, тобто частинка набуває надлишковий позитивний заряд і на неї діє притискаюча електрична сила.

При $\varepsilon_1 \gamma_{v2} < \gamma_{v1}$ (частинка добре проводить) $q_\infty < 0$, тобто частинка набуває надлишковий негативний заряд і на неї діє відриваюча електрична сила.

5.2.3 Статична електризація

Статична електризація відбувається при контакті і наступному поділі тіл, що володіють різними фізичними або хімічними властивостями. Контактуючі тіла набувають заряду різних знаків. Статична електризація відбувається і у відсутності зовнішнього поля. Основною фізичною величиною, що визначає електричні явища при контакті твердих тіл, є робота виходу електрона. Різниця робіт виходу електрона у контактуючих тіл приводить до порушення їх нейтрального стану. Матеріал, для якого робота виходу $A_{\text{вих}}$ менше, при контакті легше втрачає електрони і, таким чином, заряджається позитивно. Інтенсивність утворення зарядів пропорційно різниці робіт виходу.

Для більшості діелектричних частинок діє правило Коена: при приведенні в контакт і роз'єднання двох діелектриків речовина з більшою відносною діелектричною проникністю заряджається позитивно. Так як стан поверхні контактуючих частинок залежить від ряду факторів (параметрів зовнішнього середовища, забруднення поверхні і т.д.), то набуті заряди залежать суттєво від конкретних умов і визначаються експериментально.

Лекція №6 Процеси, що пов'язані з переміщенням частинок в електричному полі

5.3 Рух частинок в електричному полі

Рух частинок розглядається як рух їх центру мас. Це означає, що обертання частинок, якщо потрібно, слід враховувати окремо. За другим законом Ньютона:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum \vec{F}. \quad (5.20)$$

На частинку, що знаходиться в газовому (повітряному) середовищі і в електричному полі, діють наступні сили:

1. Сила тяжіння $F_{\text{mg}} = mg$, де g – вектор прискорення вільного падіння.
2. Сила дії електричного поля на заряджену частинку

$$F_q = Eq. \quad (5.21)$$

3. Сила, зумовлена нерівномірним розподілом напруженості електричного поля.

Сферична частинка, що знаходиться в електричному полі, набуває заряди поляризації $q_{\text{п}}$ (рис.5.6). Сила, діюча на сферу в неоднорідному електричному полі, дорівнює

$$F = E_1 q_{\text{п}} - E_2 q_{\text{п}} = q_{\text{п}} \delta E = q_{\text{п}} 2 \text{grad} E.$$

Оцінки сили, зумовленої нерівномірним розподілом електричного поля, показують, що вона мала в порівнянні з іншими силами, що діють на частинку, і тому цією силою можна знехтувати, за винятком випадків, коли частинка не заряджена, а неоднорідність поля велика.

4. Сила опору середовища руху частинки F_c . Сила виникає у зв'язку з тим, що рух тіла викликає появу в навколишньому просторі течію газу (повітря). Порушення течії вимагає деякої витрати енергії, яка забирається у рухомого тіла. Таким чином, тіло гальмується.

Силу опору середовища можна розрахувати, якщо відомо розподіл швидкості течії повітря, викликаной тілом. Розподіл швидкості повітря навколо рухомого тіла розраховується з рівняння Нав'є-Стокса:

$$\underbrace{\gamma_{\Pi} \frac{d\bar{u}}{dt}}_{\text{сили інерції}} = \underbrace{\gamma_{\Pi} \bar{F}}_{\text{зовнішні сили}} - \underbrace{\mu \nabla^2 \bar{u}}_{\text{сили в'язкості}} \quad (5.22)$$

і рівняння нерозривності течії рідини:

$$\operatorname{div} \bar{u} = 0.$$

Тут \bar{u} – вектор швидкості течії рідини; γ_{Π} – густина середовища (повітря); μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища ($\mu_{\text{пов}} = 1,85 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с)); p – тиск.

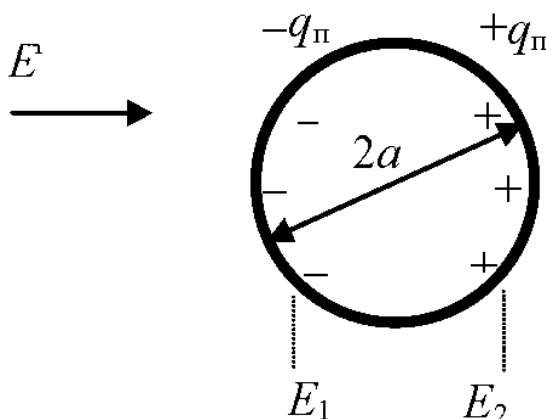


Рис. 5.6 – Поляризація частинки в електричному полі

Навіть в самому простому випадку – для сферичної частинки – рішення рівняння руху вдається отримати тільки при спрощених припущеннях. Ці спрощення визначаються величиною числа Рейнольдса, що встановлює співвідношення між силами інерції і в'язкості:

$$R_e \approx \frac{F_{\text{інерції}}}{F_{\text{в'язкості}}} = \frac{\gamma_{\Pi} \frac{d\bar{u}}{dt}}{\mu \nabla^2 \bar{u}} \cong \frac{\gamma_{\Pi} \frac{u}{l}}{\mu \frac{u}{l^2}} = \frac{\gamma_{\Pi} u l}{\mu} = \frac{u l}{\nu}, \quad (5.23)$$

де $\nu = \mu/\gamma_{\Pi}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря; l – характерний розмір течії (для течії рідини в трубі – діаметр труби; для частинки – діаметр частинки).

Для рухомої сферичної частинки

$$Re = \nu 2a / v$$

де v – швидкість частинки відносно газового середовища, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

У технологічних процесах зазвичай використовують частинки розміром не більше 300 мкм. Швидкості частинок зазвичай менше 10 м/с і найчастіше складають 1 ÷ 3 м/с. Найбільші значення числа Рейнольдса досягають 100, зазвичай вони лежать в діапазоні 0,1 ÷ 10.

Спрощуючи рівняння Нав'є-Стокса Стокс отримав формулу для сили опору сфери руху сферичної частинки, справедливую при $Re \leq 0,5$:

$$F_c = -6\pi\mu a v.$$

При більш широкому діапазоні значень Re слід використовувати наступну формулу для сили опору:

$$\bar{F}_c = -C_x \frac{\gamma_n v \bar{v}}{2} s, \quad (5.24)$$

де C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору; s – характерний перетин тіла (для сфери $s = \pi a^2$, a – радіус).

В результаті узагальнення експериментальних даних отримана залежність $C_x = f(Re)$, яка представлена рис. 5.7.

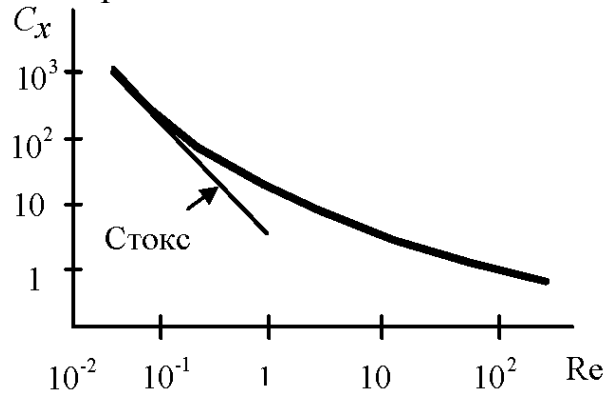


Рис.5.7 – Залежність C_x від Re

Найбільш вдалою апроксимацією цієї залежності є формула Клячко:

$$C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + Re^{\frac{2}{3}} / 6 \right) \quad (5.26)$$

З (5.25) і (5.26) випливає, що сила опору середовища нелінійно залежить від швидкості (рис. 5.8)

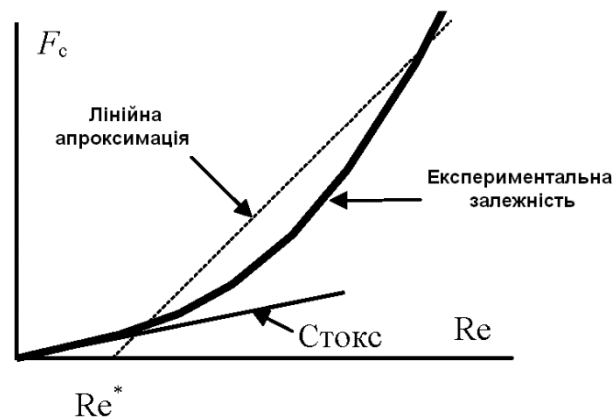


Рис. 5.8 – Лінійна апроксимація залежності сили опору від числа Рейнольдса

Для аналітичних розрахунків більш зручно використовувати лінійну апроксимацію від числа Рейнольдса:

$$F_c = k_c 6\pi \mu a (v - v^*), \quad (5.27)$$

де k_c , $v^* = (Re^* v) / 2a$ – коефіцієнти лінійної апроксимації (рис. 5.8).

Рух частинки в однорідному електричному полі.

При русі сферичної частинки зі стану спокою під дією постійних зовнішніх сил при $Re < 0,5$ рівняння руху запишеться у вигляді:

$$m \frac{dv}{dt} = F - 6\pi\mu a v, \quad (5.28)$$

де $F = Eq + mg$ – зовнішні сили, які визначаються впливом електричного та гравітаційного полів. Якщо заряд частинки і напруженість поля незмінні, то рішення рівняння має вигляд:

$$v = v_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де $v_{\text{уст}} = F / (6\pi\mu a)$ – усталена швидкість руху частинки; $\tau = m / (6\pi\mu a)$ – стала часу, що визначає характерний час зміни швидкості частинки.

Стала часу пов'язана з довжиною інерційного пробігу частинки – l_i . Якщо частинка має початкову швидкість v_0 , то при відсутності впливу зовнішніх сил до повної зупинки свого руху вона пройде шлях, рівний:

$$l_s = \int_0^{\infty} v dt = \int_0^{\infty} v_0 e^{-t/\tau} dt = v_0 \tau.$$

Чим більше проявляється вплив інерційних властивостей частинки, тим більше довжина інерційного пробігу.

Для розрахунку руху частинок при $Re > 0,5$ можна скористатися лінійною апроксимацією сили опору середовища у вигляді (5.27). Тоді рішення записується за аналогією з рішенням рівняння (5.28). Більш складний для розрахунку випадок має місце, коли заряд частинок і напруженість поля в процесі руху змінюються. Аналітичне рішення для цього випадку відсутнє.

Більш просто вирішується задача, якщо силами інерції при розрахунку можна нехтувати. Можливість такого спрощення визначається числом Стокса.

Число Стокса являє собою відношення довжини інерційного пробігу частинки при швидкості v_x до характерного розміру l – відстані, на якій діюча на частинку зовнішня сила зазнає зміни, розмірної з її середнім значенням:

$$St = l_i / l = v_x \tau / l. \quad (5.29)$$

Під характерною швидкістю розуміється швидкість, обумовлена дією зовнішніх сил без урахування сил інерції.

Таким чином, число Стокса визначає вплив сил інерції на рух частинки під дією змінної зовнішньої сили. Якщо $St \ll 1$, то рух частинки можна вважати безінерційним.

За аналогією з поняттям рухливості іонів можна ввести поняття рухливості частинки:

$$B_p = v/E = qB, \text{ де } B = v/F = 1/6\pi\mu a.$$

Таким чином, рухливість частинки, що володіє зарядом q , являє собою сталу швидкість руху в полі одиничної напруженості.

Для випадку, коли частинка набуває заряд в полі коронного розряду, можна побудувати залежність рухливості від розміру частинок (рис. 5.9).

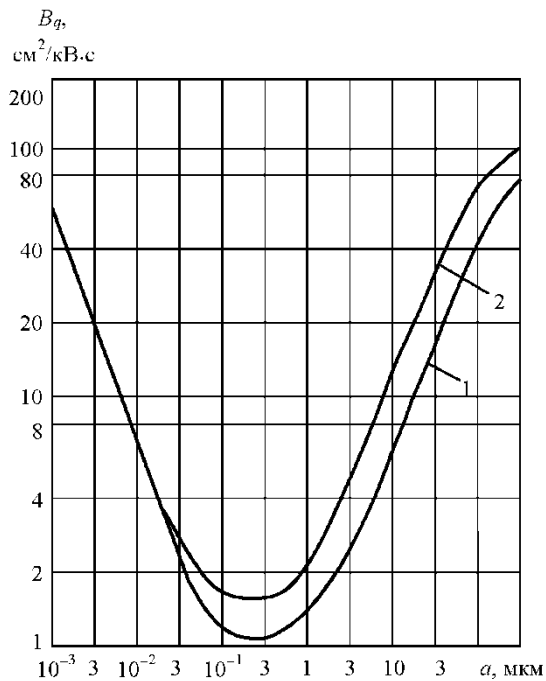


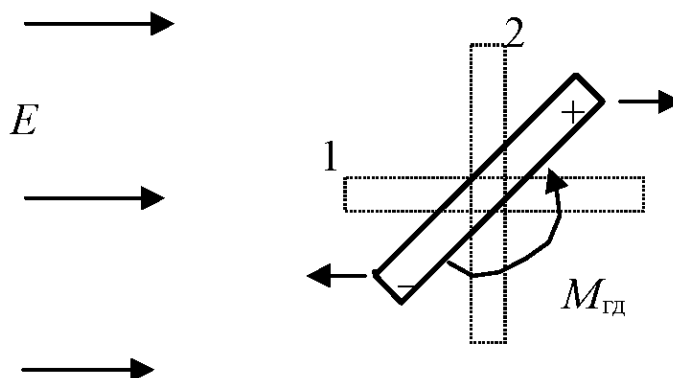
Рис. 5.9 – Залежність рухливості B_q від радіуса частинок
1 – $E = 1$ кВ/см; 2 – $E = 3$ кВ/см

Рухливість має мінімум при розмірі частинок $2a$ рівному $0,3 \div 0,5$ мкм. Зростання рухливості для частинок дуже малого розміру пояснюється зменшенням сили опору середовища через те, що розмір частинок стає сумірним з довжиною вільного пробігу молекул повітря (поправка Кенінгема).

Зростання рухливості для частинок $2a \geq 1$ мкм пояснюється тим, що починає працювати механізм «ударного» зарядження і має місце квадратичний характер залежності заряду від розміру частинок. Тоді відповідно до (5.29) рухливість зростає пропорційно розміру частинок.

Для розрахунку сили опору середовища руху частинок несферичної форми використовується заміна на еліпсоїд, еквівалентний частинці за об'ємом і співвідношенням осей. В літературі є дані по коефіцієнту опору для еліпсоїдів.

При русі починаючи з перехідного значення Re частинки набувають певну орієнтацію (за рахунок гідродинамічній взаємодії з навколишнім середовищем). Орієнтація така, що частинка при русі одержує максимальний опір. Наприклад, на циліндричну подовжену частинку при русі в повітряному середовищі в електричному полі діють два обертаючих моменти (рис. 5.10).



Рив. 5.10 – Сили, що діють на частинку несферичної форми

З одного боку електричне поле прагне розвернути поляризовану частинку таким чином, щоб вона розташувалась своєю великою віссю уздовж силових ліній електричного поля (положення 1). З іншого боку гідродинамічні сили опору середовища руху частинки – $M_{ГД}$ – прагне розвернути її таким чином, щоб лобовий опір був максимальним з усіх можливих положень частинки, тобто перпендикулярно напрямку руху частинки під дією сил електричного поля. В результаті може встановлюватися деяка проміжна орієнтація частинки в електричному полі, як показано на рис. 5.10.

5.4 Колективні процеси в зарядженому аерозолі

Із збільшенням концентрації частинок вже стає неможливим розглядати рух частинок незалежно, а необхідно враховувати їх взаємний вплив.

По-перше, змінюються умови зарядження частинок. Через збільшення концентрації частинок їх зарядження може відбуватися при дефіциті іонів. Це призводить до уповільнення процесу зарядження. Крім того, змінюється розподіл напруженості поля, що впливає на граничний заряд частинок. Більш сильний вплив справляє на процес зарядження дефіцит іонів. Перерозподіл поля відбувається не в настільки сильному ступені і тому робить менший вплив.

При великій концентрації частинок починає діяти процес об'єднання частинок в агрегати при зіткненні один з одним. Для коагуляції необхідні зіткнення і, в залежності від механізму, що викликає зіткнення, розрізняють ряд видів коагуляції, серед яких найбільш важливе значення мають гравітаційна (різна швидкість падіння частинок різного розміру під дією сили тяжіння) і електрична (взаємодія заряджених і незаряджених частинок в електричному полі).

Нарешті, змінюються закономірності руху частинок через вплив електричного поля, створеного сукупною дією інших частинок. Прикладом є електростатичне розсіювання хмари заряджених частинок.

ТЕМА 6 ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ЧАСТИНОК У ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАХ

Лекція №7 Процеси, що відбуваються в електрофільтрах

6.1 Задача очищення газів від пилу

У багатьох технологічних процесах промислові гази містять дрібні тверді або рідкі частинки, від яких повинні бути очищені. В цілому ряді виробництв ці частинки є кінцевим продуктом, наприклад, в виробництві деяких кольорових металів, сажі, цементу, уловлюванні каталізаторів при нафто-перегонці.

В інших випадках потрібна очистка газу від зважених частинок, як, наприклад, при підготовці повітря при виробництві сірчаної кислоти, або очищення повітря в спеціальних приміщеннях при виробництві напівпровідникових приладів або фотокіноплівки. Набувають поширення побутові електрофільтри, використовувані для очищення повітря житлових приміщень.

Найбільш широке поширення одержали електрофільтри для санітарної очистки димових газів теплових електростанцій. Так при спалюванні твердого палива тільки на одному блоці потужністю 500 МВт утворюється приблизно 500 м^3 димових газів в секунду, що містять до 20 г/м^3 зважених частинок золи. Це відповідає викидам в атмосферу 36 тон золи на годину.

Електрофільтри є на сьогоднішній день найбільш ефективним засобом очищення газів завдяки ряду особливостей:

1. У електрофільтрах досягається високий ступінь очищення газу до 99,9 %;
2. Електрофільтри мають дуже низький гідравлічний опір потоку газу;
3. Електрофільтри дозволяють вловлювати зважені частинки в широкому діапазоні розмірів (від частинок мікрометрів до десятків міліметрів);
4. Електрофільтри легко регенеруються
5. Весь процес очищення газів електрофільтрами легко піддається автоматизації.

Альтернативними способами очищення газів є:

1. Рукавні фільтри (володіють високим динамічним опором, який росте в міру набору пилу і важко регенеруються);
2. Циклони і механічні сепаратори (дозволяють добре вловлювати великі частинки, але мають низький ступінь очищення для дрібних частинок);
3. Мокрі скрубери (мають велику витрату води і відносно високий гідравлічний опір).

6.2 Принципова схема електрофільтру

Принципова схема електрофільтру представлена на рис. 6.1. Між двома плоскими осаджувальними електродами розташований ряд коронуючих проводів. В проміжок між коронуючими і осаджувальними електродами надходить запилений газ.

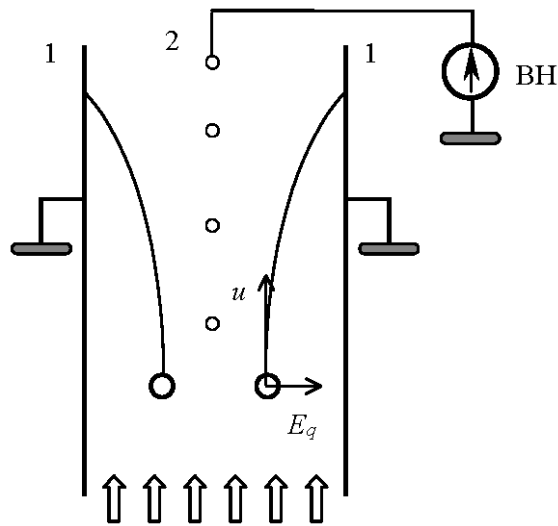


Рис. 6.1 – Принципова схема електрофільтру, де
1 – осаджувальні електроди; 2 – коронуючі електроди

В поле коронного розряду, що виникає при подачі високої напруги на дроти, частинки заряджаються і під дією поля рухаються до осаджувальних площин, з яких вони періодично видаляються. Таким чином, концентрація зважених частинок у міру проходження через електрофільтр поступово зменшується.

6.3 Ступінь очищення газів в електрофільтрі

Ступінь очищення газу в електрофільтрі є основною характеристикою ефективності його роботи. Він визначається вмістом пилу або рідких частинок в газі до надходження в електрофільтр і після виходу з нього:

$$\eta = \frac{Z_{\text{вх}} - Z_{\text{вих}}}{Z_{\text{вх}}} = 1 - \frac{Z_{\text{вих}}}{Z_{\text{вх}}},$$

де $Z_{\text{вх}}$ – концентрації пилу на вході в електрофільтр; $Z_{\text{вих}}$ – концентрація пилу на виході з електрофільтру.

Осадження частинок відбувається з області, що безпосередньо граничить з електродом. Спад частинок в цій області заповнюється за рахунок дрейфу частинок в електричному полі і за рахунок захоплення їх турбулентними потоками.

Так як протяг газу в електрофільтрі завжди турбулентний, то саме це сприяє вирівнюванню розподілу концентрації частинок в міжелектродному проміжку.

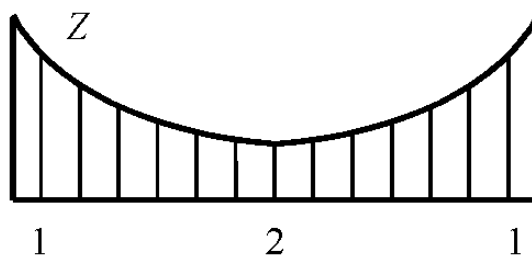


Рис. 6.2 – Розподіл концентрації в міжелектродному проміжку, де
1 – осаджувальні електроди; 2 – коронуючі електроди

В результаті дії всіх факторів: дрейфу частинок в полі, осадження частинок на електродах і турбулентних пульсацій в міжелектродному проміжку встановлюється певний розподіл концентрації (рис. 6.2). Будемо вважати, що закон розподілу концентрації частинок не змінюється по довжині електрофільтру, а зменшується лише абсолютне значення концентрації.

Ступінь очищення визначається середньою по перетину концентрацією пилу, яку ми позначимо Z_x , де за координату x приймається відстань від входу в електрофільтр до розглянутого перерізу.

Кількість осадженого пилу визначається концентрацією пилу біля осаджувального електрода Z_{oc} .

Так як ми прийняли, що закон розподілу концентрації незмінний по довжині електрофільтру, то $Z_{oc}/Z_x = \chi$ є незмінною на будь-якому віддаленні від входу в електрофільтр.

Маса пилу g , що міститься в обсязі міжелектродного проміжку довжиною dx , віддаленому від входу в електрофільтр на відстані x , дорівнює:

$$g = Z_x 2bHdx$$

де H – відстань між коронуючими та осаджувальними електродами, b – ширина осаджувального електрода.

Зменшення маси пилу за рахунок осадження за час $d\tau$ на поверхню електродів площею $2b dx$ буде дорівнювати:

$$dg = -Z_{oc} 2b v dx d\tau,$$

де v – швидкість дрейфу під дією поля біля поверхні осаджувального електрода.

Об'єднуючи записані співвідношення, одержуємо:

$$\frac{dg}{g} = -\frac{Z_{oc}}{Z_x} \frac{2b}{2b} \frac{v dx d\tau}{H dx} = -\chi v \frac{d\tau}{H} \quad \text{або} \quad \frac{dZ_x}{Z_x} = -\chi v \frac{d\tau}{H}.$$

Після інтегрування останнього диференціального рівняння, враховуючи, що

$d\tau = dx/u$ отримуємо:

$$Z_{вих} = Z_{вх} \exp\left(-\frac{v\chi l}{uH}\right),$$

де l – довжина електрофільтру, а u – швидкість газу в електрофільтрі.

Таким чином, ступінь очищення газу електрофільтром (у відсотках) дорівнює:

$$\eta = \left[1 - \exp\left(-\frac{v\chi l}{uH}\right)\right] \cdot 100\% .$$

Для підвищення ефективності уловлювання пилу необхідно з одного боку збільшувати швидкість руху частинок до осаджувального електрода і довжину електрофільтру, а з іншого боку зменшувати швидкість газового потоку та ширину міжелектродної відстані.

Якщо ми маємо справу з полідисперсним складом пилу (частинки різного розміру), то розрахунки ведуться за кожною фракцією окремо, а потім інтегральна ступінь очищення визначається як сума середньозважених ступенів очищення окремих фракцій:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i g_i,$$

де g_i – частинка i -ої фракції.

Швидкість руху частинок до осаджувального електрода (швидкість дрейфу частинок) визначається головним чином дією електричних сил. Тому, як було показано раніше, встановлена швидкість руху частинок може бути записана у вигляді:

$$v = qE / 6\pi\mu a,$$

де $\alpha > 1$ мкм $q \sim C_1 a^2 E$ або $v \sim a E^2$.

З отриманого співвідношення випливає, що в першу чергу в електрофільтрі осідають великі частинки, а потім дрібні, у яких швидкість дрейфу мала.

Квадратичний характер залежності швидкості від напруженості поля свідчить про доцільність роботи електрофільтру на гранично можливих напругах, що очевидно, відповідає передпробивному режиму.

При цьому краще працювати на негативній полярності напруги живлення, тому що при цьому коронний розряд більш стійкий, а пробивна напруга значно вище.

6.4 Вплив концентрації дисперсної фази на характеристики

коронного розряду і процес очищення газу електрофільтрами

При наявності дисперсної фази в міжелектродному проміжку сумарний об'ємний заряд буде визначатися вже не тільки об'ємним зарядом іонів, а і об'ємним зарядом заряджених частинок, що знаходяться в проміжку. При певній концентрації дисперсної фази об'ємний заряд частинок стає порівняним з об'ємним зарядом іонів і починає істотно впливати на процеси розвитку розряду. Система рівнянь описує процеси в міжелектродному проміжку може бути представлена у вигляді:

$$\begin{cases} \operatorname{div} E = (\rho_i + \rho_p) / \varepsilon_0, \\ \operatorname{div} (J_i + J_p) = 0, \\ J_i = k \rho_i E, \\ J_p = \rho_p (q B_p E + u), \\ \operatorname{grad} \varphi = -E. \end{cases}$$

де u – середня швидкість руху газового середовища, індекси i і p відносяться відповідно до іонів і частинок.

Так як рухливість іонів $k \gg B_p$, струм визначається в основному іонною складовою. Об'ємний заряд частинок грає роль негативного зворотного зв'язку.

Частинки пилу в полі коронного розряду набувають заряд того ж знаку, що і знак корони. Рухливість заряджених частинок пилу мала в порівнянні з рухливістю іонів. Заряджені частинки пилу створюють власне електричне поле, вектор якого спрямований зустрічно полю іонів коронного розряду, і ця обставина змушує іони уповільнювати свій рух від коронуючого електрода до

осаджувального електроду. Крім того, електричне поле об'ємного заряду частинок пилу знижує напруженість електричного поля на поверхні коронуючого електрода і тим самим зменшує струм коронного розряду. В результаті струм корони значно зменшується.

Це явище – зменшення струму корони – називається замиканням струму корони. При цьому, як наслідок, погіршується зарядження частинок пилу.

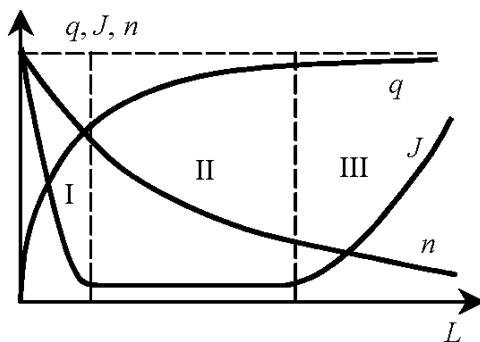


Рис. 6.3 – Зміна струму, концентрації і заряду частинок по довжині електрофільтру

Зміна густини іонного струму, концентрації частинок і їх середнього заряду по довжині електрофільтру, представлено на рис. 6.3, наочно демонструє процес замикання коронного розряду при високих вхідних концентраціях дисперсної фази.

На представленому рисунку можна виділити три характерні зони. У зоні I відбувається порівняно швидке зарядження частинок до заряду, при якому струм через замикання коронного розряду падає практично до нуля. Концентрація частинок через короткочасність цієї стадії змінюється незначно. У зоні II через осадження частинок концентрація зменшується, що призводить до часткового відмикання струму корони і повільного підзарядження частинок, такого, що густина об'ємного заряду частинок завжди залишається близькою до замикаючої. При наближенні заряду до граничного швидкість зарядження різко зменшується. Починаючи з цього моменту (зона III електрофільтру) зменшення концентрації не може бути компенсовано збільшенням заряду частинок і коронний розряд поступово відмикається, що супроводжується ростом струму.

6.5 Формування шару частинок на електроді і виникнення зворотного коронного розряду

Опір пилу, яка вловлюється електродами, може змінюватися в дуже широких межах, що в свою чергу істотно впливає на процес уловлювання пилу. Умовно пил поділяють на три групи за рівнями питомого опору.

До першої групи відноситься ті, які добре проводять пил, що має питомий опір $\rho_v \leq 10^2$ Ом·м. Пил першої групи вловлюється погано, тому що при осадженні частинки швидко перезаряджаються, відштовхуються від електрода і несуться потоком газу.

До пилу другої групи відносять пил, питомий об'ємний опір якого лежить в межах $10^2 < \rho_v < 10^8$ Ом·м. Пил другої групи вловлюється добре в електрофільтрах. Заряд частинок пилу рівномірно стікає на осаджувальний

електрод у міру осадження нових частинок і підходу до шару іонів. Таким чином частинки добре утримуються на поверхні шару в процесі пиловловлення.

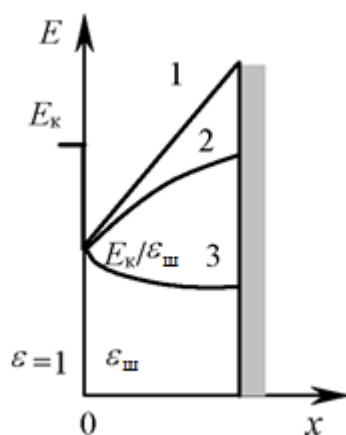


Рис. 6.4 – Розподіл напруженості поля всередині порошкового шару для 1 – діелектричних; 2 – напівпровідних; 3 – провідних частинок

До пилу третьої групи відноситься пил з питомим об'ємним опором $\rho_v \geq 10^8$ Ом·м. Цей пил найбільш важко уловлюється через виникнення зворотної корони. Частинки, що осіли на осаджувальний електрод, довго зберігають свій заряд через високий опір частинок пилу. Заряди, що містяться в шарі, визначають розподіл напруженості електричного поля в шарі.

На рис. 6.4 представлені три характерних випадки розподілу напруженості поля всередині шару частинок в залежності від їх провідності.

Подивимося, як змінюється напруженість електричного поля в шарі для заряджених діелектричних частинок.

За рівняння Пуассона:

$$\operatorname{div} E = \rho / \varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_0.$$

Для одновимірного випадку:

$$\frac{dE}{dx} = \rho / \varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_0.$$

Розділяємо змінні та інтегруємо:

$$\int_{E_k/\varepsilon_{\text{ш}}}^E dE = \frac{\rho}{\varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_0} \int_0^x dx$$

Рішенням є: $E = E_k / \varepsilon_{\text{ш}} + \rho x / (\varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_0)$. Тобто отримали лінійну залежність від координати x .

Отже, для діелектричних і напівпровідних частинок по мірі зростання товщини шару напруженість зростає і може навіть істотно перевищити зовнішню напруженість поля, незважаючи на те, що $\varepsilon_{\text{зн}} < \varepsilon_{\text{ш}}$. У газових включеннях, наявних усередині шару, починаються іонізаційні процеси, які призведуть до пробоя всього шару. В результаті пробоя утворюється кратер, порошок з якого викидається в міжелектродний проміжок. Після пробоя шару навколо кратера починається також розряд по поверхні, який знімає поверхневий заряд.

В результаті цих іонізаційних процесів починається емісія іонів протилежного знаку в міжелектродний проміжок. Це явище носить назву зворотного коронного розряду. Встановлено, що пробій шару настає при $\rho_v > 10^8 \div 10^9$ Ом·м. Це співвідношення прийнято вважати критерієм виникнення зворотного коронного розряду.

Час виникнення зворотного коронного розряду легко визначити з умови зарядження шару без урахування витоків зарядів через шар.

$$E_{\text{ш}} \varepsilon_{\text{ш}} - E_k = \sigma / \varepsilon_0,$$

де $E_{\text{ш}}$ – напруженість в шарі частинок, E_k – напруженість поля коронного розряду на поверхні шару. Враховуючи, що $\sigma = Jt$, отримаємо при виникненні зворотної корони:

$$E_{\text{пр.ш}} \varepsilon_{\text{ш}} - E_k = J t_{\text{зк}} / \varepsilon_0,$$

де $E_{\text{пр.ш}}$ – пробивна напруженість в шарі частинок, $t_{\text{зк}}$ – час виникнення зворотного коронного розряду.

Час виникнення зворотного коронного розряду дорівнюватиме:

$$t_{\text{зк}} = 2 \varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_0 \left(E_{\text{пр.ш}} - \frac{E_k}{\varepsilon_{\text{ш}}} \right) / J.$$

Тут введено поправочний коефіцієнт рівний 2, який враховує перехід від початкової форми до інтенсивному зворотному коронному розряду, який надає істотний вплив на процеси в електрофільтрі.

Наявність зворотного коронного розряду негативно впливає на процес очищення газу в електрофільтрі в силу наступних причин:

1. Через появу в міжелектродному проміжку об'ємного заряду протилежного знаку знижується напруженість поля біля поверхні осаджувального електрода.

2. Відбувається часткове розрядження і навіть перезарядження частинок порошку, що наближаються до осаджувального електрода.

3. Посилюється вторинне винесення частинок з поверхні шару в результаті їх перезарядження.

При інтенсивному зворотному коронному розряді процес осадження може повністю припинитися. Найбільше поширення набули три способи боротьби з цим шкідливим явищем:

1. Кондиціювання топкових газів, наприклад, введенням аміаку, що приводить до зниження питомого об'ємного опору нижче критичного рівня.

2. Імпульсне живлення коронуючих електродів, що знижує потік іонів до поверхні шару. Зменшення густини струму приводить до уповільнення наростання напруги на шарі і, отже, до зменшення ймовірності виникнення зворотної корони.

3. Знакозмінне живлення електрофільтру дозволяє змінювати полярність постійної напруги на коронуючих електродах електрофільтру на протилежну в момент, коли напруга на шарі наблизиться до напруги виникнення зворотної корони. Таким чином, на осаджувальному електроді формується загальний шар пилу, що складається з тонких протилежно заряджених шарів пилу, що в кінцевому підсумку знижує напруженість електричного поля в шарі пилу і зменшує ймовірність виникнення зворотної корони.

6.6 Конструкція електрофільтрів

Використовуються електрофільтри, які мають різну конструкцію. Вони бувають трубчасті (рис 6.5, а) і пластинчасті (рис 6.5, б).

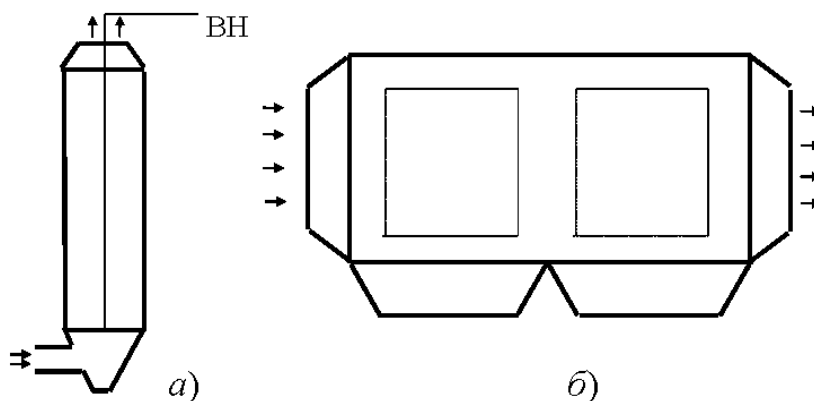


Рис. 6.5 – Конструкції електрофільтрів, де
а) трубчастий; б) пластинчастий багатопольний

Трубчасті електрофільтри – апарати з вертикальним потоком газу. Підлягають очищенню газів, які проходять всередині трубчастих осаджувальних електродів, по осі яких розташовуються коронуючі дроти. Шар пилу періодичним струшуванням електродів видаляється в пило-збірник, що знаходиться в нижній частині електрофільтру.

Пластинчасті електрофільтри – апарати з осаджувальним електродом у вигляді пластин, розташованих на деякій відстані один від одного. Між пластинами розташовані коронуючі електроди, укріплені на рамах.

В одному корпусі електрофільтру може бути розташовано декілька незалежних послідовно розташованих систем електродів, або, як прийнято їх називати в практиці газоочистки, електричних полів.

Величезну роль в досягненні максимальної ефективності пиловловлення грає конструктивне виконання коронуючих і осаджувальних електродів.

Коронуючі електроди можна розділити на дві групи (рис. 6.6). До першої групи відносяться електроди, які не мають фіксовані коронуючі точки. При негативній короні – негативної полярності коронуючих електродів – світні точки розташовуються вздовж електрода на різних відстанях один від одного залежно від стану поверхні електрода. Типові види електродів цієї групи: круглий діаметром 2÷4 мм, квадратний із стороною 3÷4 мм і штикового перетину, який вписується в квадрат зі стороною 4÷5 мм (рис. 6.6, а).

До другої групи належать електроди з фіксованими точками розряду по їх довжині. Типовими видами цих електродів є колючий дріт, пилкоподібні і голчасті електроди (рис. 6.6, б). Електроди другої групи при однаковій напрузі та міжелектродній відстані забезпечують значно більший струм корони, ніж електроди першої групи. Легше забезпечується необхідна механічна міцність. В даний час набули широкого поширення коронуючі електроди стрічково-

голчастого типу. Вони легко виготовляються шляхом штампування і при наявності достатньої механічної міцності володіють хорошими електричними характеристиками.

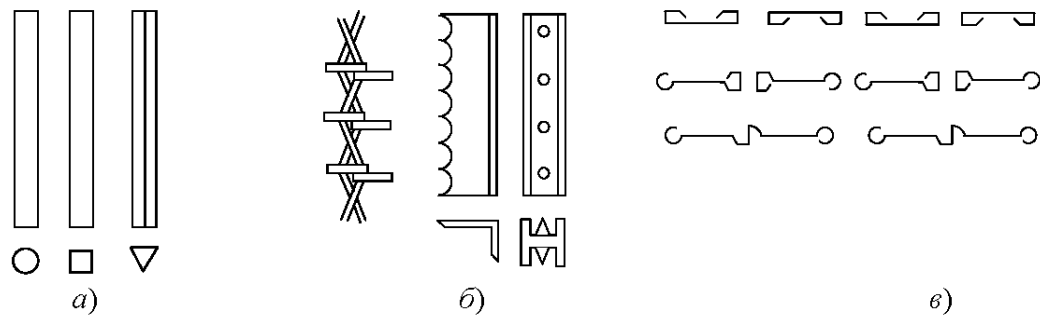


Рис. 6.6 – Електроди електрофільтрів, де
 а) – гладкі коронуючі електроди; б) – коронуючі електроди з
 фіксованими точками розряду; в) – осаджувальні електроди

Осаджувальні електроди електрофільтрів також мають різноманітну форму: вони мають гладку поверхню без гострих кутів, необхідну для забезпечення високої напруженості електричного поля, і порожнини, що дозволяють струшувати пил з мінімальним вторинним винесенням (рис. 6.6, в).

Для успішної роботи електрофільтрів має важливе значення установка коронуючих проводів точно по осі між осаджувальними пластинами. До теперішнього часу застосовувалися апарати з відстанню між осаджувальними електродами 275 мм. Крок між коронуючими проводами становить 100 ÷ 200 мм. Є тенденція до збільшення відстані між осаджувальними електродами до 450 мм і навіть до 600 мм. Дослідно-промислові випробування таких електрофільтрів показали, що, незважаючи на передбачення теорії, зниження ступеня очищення не відбувається, тому що істотно зростає пробивна напруга проміжків.

ТЕМА 7 НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Лекція №8 Процеси електрофарбування та нанесення порошкових покриттів

7.1 Електрофарбування

Фарбування виробів є одним з технологічних процесів, при якому застосування електричного поля ефективно. Принципово технологія електрофарбування полягає в розпилюванні і зарядці частинок фарби і осадженні заряджених частинок фарби на виріб в електричному полі. В результаті на виробі формується рівномірний тонкий шар фарби.

Переваги при фарбуванні в електричному полі в порівнянні з пневматичним фарбуванням полягають у:

- 1) зменшенні втрат фарби до $10 \div 20\%$ замість $50 \div 70\%$;
- 2) зменшення забруднень навколишнього середовища;
- 3) підвищення адгезії покриття до поверхні виробу.

Процес розпилення рідини в електричному полі відбувається наступним чином (рис. 7.1).

Крапля на виході з розпилювача зростає до тих пір, поки діючі на неї електричні сили не перевищать сили поверхневого натягу. Відбувається порушення стійкості поверхні на вершині краплі де поле максимальне і, як наслідок, викид тонкої цівки. Далі ця тонка цівка дробиться на дрібні краплі. Викид тонкої цівки є умовою дрібнодисперсного розпилення рідини в електричному полі.

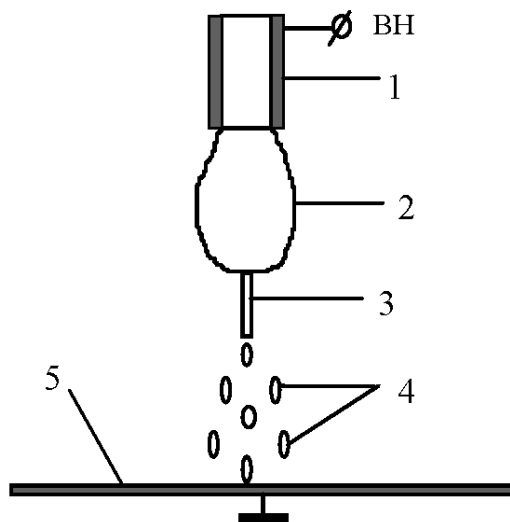


Рис. 7.1 – Процес зарядження і розпилення фарби, де
1 – сопло розпилювача; 2 – крапля фарби; 3 – цівка фарби;
4 – дрібні краплі після дроблення цівки; 5 – виріб

На процес розпилення мають найбільший вплив напруженість поля в безпосередній близькості від розпилювача, поверхневий натяг, провідність, в'язкість рідини, а також витрата рідини, тобто швидкість її надходження в зону розпилювання.

При малій напруженості поля розпилювання не відбувається, так як електрична сила недостатня, щоб подолати силу поверхневого натягу. Від

розпилювача відриваються великі краплі під дією своєї ваги. Для збільшення напруженості електричного поля прагнуть зменшити радіус закруглення кромки сопла розпилювача ($E_{\text{кромки}} \geq 10 \text{ кВ/см}$).

Якщо поверхневий натяг значний, то можливо, що раніше, ніж відбудеться порушення стійкості поверхні краплі, почнеться коронний розряд, що перешкоджає подальшому збільшенню напруженості поля в поверхні краплі. Коефіцієнт поверхневого натягу фарби не повинен перевищувати $(4 \div 5) \cdot 10^6 \text{ Н/см}$.

Провідність фарби справляє вирішальний вплив на процес накопичення заряду на краплі рідини. Рідина з дуже малою електричною провідністю (менше $10^{-8} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$) не розпилюється в електричному полі. Чим вище провідність, тим швидше підтікає заряд і більше сила, що впливає на краплю. Однак при збільшенні провідності вище $10^{-2} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$ розпилювання фарби знову припиняється. Це пов'язано з виникненням коронного розряду на краплі і впровадженням в проміжок великого об'ємного заряду, що знижує напруженість електричного поля на кромці сопла розпилювача. Оптимальна провідність фарби лежить в діапазоні $10^{-5} \div 10^{-6} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$.

Дуже в'язкі рідини також погано розпилюється в електричному полі, оскільки в'язкість рідини обмежує можливість викиду тонкої нитки. Зі збільшенням в'язкості зростає діаметр нитки і відповідно розмір крапель, на які вона дробиться. В'язкість фарби повинна бути не більше $0,07 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Оптимальний розмір частинок фарби становить $15 \div 30 \text{ мкм}$.

У промисловості застосовуються дві системи фарбування: електростатична (лоткові і щілинні розпилювачі) та фарбування з механічним розпиленням (відцентрові, гідравлічні та пневматичні розпилювачі) (рис. 7.2).

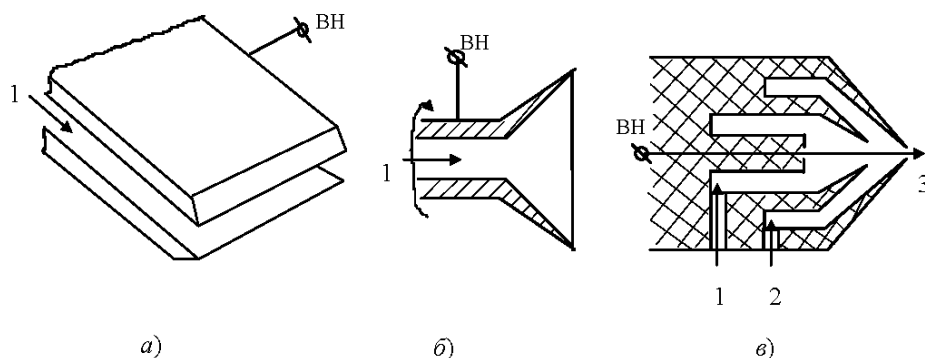


Рис. 7.2 – Конструкції електрофарбних розпилювачів, де
а) лоткові; б) відцентрові; в) електропневматичні
Подача: 1 – фарби; 2 – повітря, 3 – коронуючий електрод

Електростатичне фарбування полягає в зарядці і розпиленні рідини за рахунок електричних сил, діючих на краплю, що знаходиться на кромці розпилювача.

В системах з механічним розпиленням використовуються відцентрове, пневматичне, безповітряне (при подачі під великим тиском) дроблення фарби. У цих розпилювачах електричне поле використовується тільки для переміщення і осадження крапель на виріб. Найбільшого поширення набули електропневматичні розпилювачі, які мають більшу продуктивність, краще

фарбують порожнини і поглиблення в деталях, не пред'являють жорстких вимог до параметрів фарби. Через наявність потоків повітря втрати фарби дещо більше, ніж у електростатичних розпилювачів (20 % замість 5÷10 %), але істотно менше, ніж у пневматичних розпилювачів.

7.2 Нанесення порошкових покриттів

Процес нанесення порошкових полімерних матеріалів в електричному полі полягає в зарядженні частинок порошку, перенесення їх потоками повітря до напилюваного виробу, осадженні частинок під дією електричного поля на поверхню виробу і оплавленні шару порошку в електропечах з утворенням суцільного полімерного покриття на поверхні виробу.

Переваги методу:

1) майже 100 % використання матеріалу після уловлювання неосівшого на виріб порошку і повторного його застосування при напиленні покриття;

2) незначна кількість розчинників в матеріалі фарби (не більше 5 %) порівняно з рідкими фарбами, де розчинника міститься до 50 %, а значить істотно менше забруднення навколишнього середовища газовими викидами;

3) отримання покриттів з унікальними властивостями (фторопласт, поліамід, поліуретан);

4) отримання товстих покриттів (до декількох міліметрів) на виробах складної форми (для ізоляційних конструкцій і в хімічній промисловості).

Зарядження частинок порошкового матеріалу в установках для напилення здійснюють, використовуючи наступні два методи: іонне зарядження – осадження іонів з об'єму газу з полем коронного розряду і статичну електризацію – обмін зарядами між частинками і між частинками і елементами конструкції розпилювача при контакті між ними.

Для використовуваних при нанесенні покриттів порошкових матеріалів з радіусами частинок $a > 1$ мкм іонне зарядження відбувається переважно за рахунок руху іонів коронного розряду в електричному полі і осадження їх на поверхню частинок («ударне зарядження»). Статична електризація здійснюється шляхом обміну зарядами за рахунок різниці в роботі виходу електронів у матеріалу частинок і матеріалу стінок в зарядному пристрої або при обміні зарядами між частинками через відмінності в хімічному складі домішок, температури, фазовому стані, структури поверхні і т.д. На практиці для оцінки знаку зарядів статичної електризації використовують правило Коена, відповідно до якого при приведенні в контакт і роз'єднання двох діелектриків речовина з найбільшою відносною діелектричною проникністю заряджається позитивно.

Існують два варіанти пристроїв для нанесення порошкових полімерних покриттів в електричному полі: за допомогою розпилювачів (рис. 7.3) і за допомогою камер з електричним киплячим шаром (рис. 7.4).

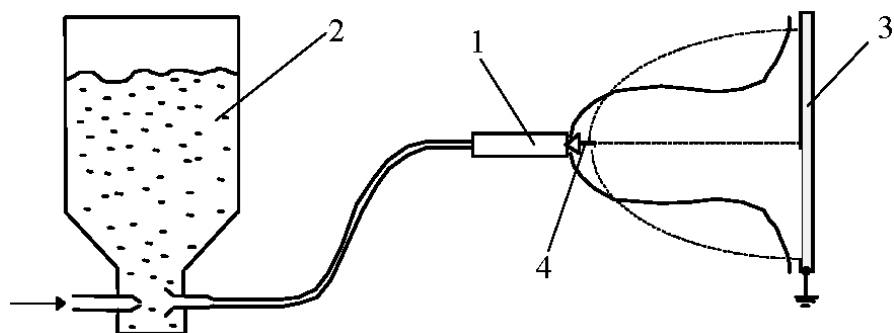


Рис. 7.3 – Нанесення покриття за допомогою розпилювача

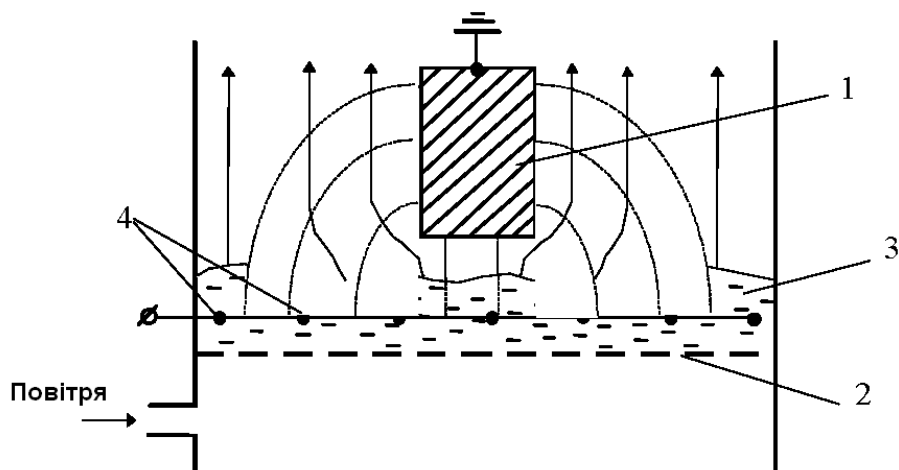


Рис. 7.4 – Нанесення покриття в камері з киплячим шаром

При нанесенні покриттів розпилювачем (рис. 7.3) порошковий матеріал забирається з завантажувального бункера (2) дозуючим ежектором і в зваженому стані в потоці повітря по гнучкому трубопроводу подається до розпилювача (1), який виконує дві функції: формує порошкову хмару навколо виробу і здійснює зарядження частинок порошку. Зарядження частинок здійснюється в полі коронного розряду між голкою (4), яка з'єднана з джерелом постійної напруги, і заземленим виробом (3). Якщо частинки набувають надлишковий заряд всередині корпусу розпилювача, то він називається розпилювачем з внутрішнім зарядженням. Зарядження може здійснюватися як в полі коронного розряду, створюваного всередині корпусу розпилювача, так і шляхом статичної електризації частинок порошку при терті об внутрішні стінки порожнин в корпусі розпилювача (який в цьому випадку називається трибоелектричним розпилювачем).

При здійсненні зарядження частинок в полі коронного розряду всередині корпусу розпилювача повинні враховуватися наступні два фактори: замикання коронного розряду іонами, які осіли на внутрішні стінки камери, в якій створюється коронний розряд, і осадження заряджених частинок порошку на заземлений електрод зарядного пристрою, що призводить до виникнення зворотного коронного розряду в утвореному шарі порошку на електроді і до погіршення зарядження частинок порошку.

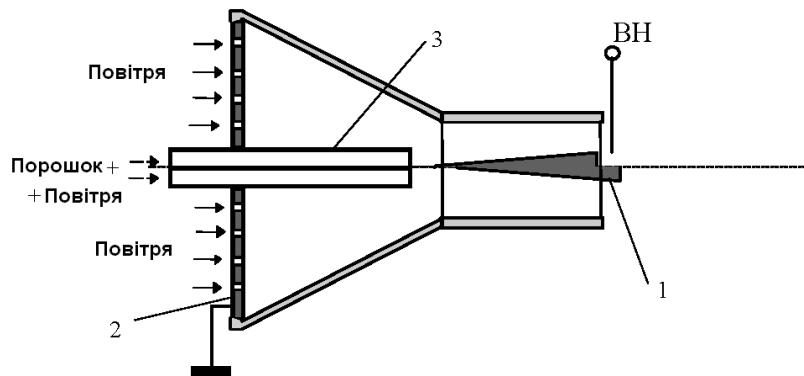


Рис. 7.5 – Розпилювач з внутрішнім зарядженням

На рис. 7.5 показано зарядний пристрій, в якому несприятливі фактори вирішуються, по-перше, збільшенням об'єму міжелектродного простору і, по-друге, створенням додаткових повітряних потоків через пористий заземлений електрод – 2, що перешкоджають осадженню частинок на некоронуючий електрод. Крім того, потік порошкового матеріалу, що подається в поле коронного розряду по діелектричній трубці – 3, обжимається чистим потоком повітря і прямує вузьким струменем на кінчик коронуючої голки – 1, сприяючи придбаннями частинками порошку зарядів в області з високою напруженістю електричного поля.

Зарядні пристрої трибоелектричних розпилювачів повинні задовольняти наступним трьом умовам необхідним для ефективного зарядження напилюваного матеріалу:

- забезпечувати багаторазові та ефективні зіткнення частинок порошку з трибоелектризуючим елементом;
- проводити зняття поверхневого заряду з трибоелектризуючого елемента;
- забезпечувати стабільність процесу трибозарядження.

Збільшення числа та ефективності актів зіткнення частинок з поверхнею зарядного пристрою досягається турбулізацією несучої частинки потоку повітря, зміною напрямку його руху і збільшенням швидкості потоку, а також підбором матеріалу трибоелектризуючого елемента по відношенню до матеріалу порошку, що наноситься.

Часто трибоелектризуючі пристрої виконуються у вигляді вигнутих трубок, спіралей, гвинтових каналів в циліндрі, електродів і т.д. Трибоелектризуючий елемент зазвичай виконується з діелектричного матеріалу. У зв'язку з цим при роботі на поверхні трибоелектризуючого елемента накопичується заряд за знаком протилежний заряду частинок, що погіршує ефективність статичної електризації. Зняття поверхневого заряду з внутрішньої поверхні каналів досягається або введенням заземленого циліндричного електрода з малим радіусом заокруглення, або введенням через стінки великої кількості заземлених голок у внутрішню порожнину каналів. Стабільність процесу статичної електризації забезпечується підтримкою незмінною вологості осушеного повітря, використовуваного для транспортування порошку, на рівні до 10 °С точки роси.

Якщо зарядження частинок порошку здійснюється в полі коронного розряду, створюваного між коронуючими електродами, розташованими в області вихідного сопла розпилювача, і заземленим виробом, то такий пристрій називається розпилювачем із зовнішнім зарядженням. В якості коронуючих електродів може використовуватися одна або кілька голок, коронуюча кромка.

Величина заряду частинок, що набуває в полі коронного розряду, визначається граничним зарядом і ступенем недозарядження $q = q_m \xi$, де q_m – граничний заряд, який визначається за (5.9), ξ – ступінь недозарядження через обмежений час зарядження. Відповідно до (5.9) $\xi = \frac{en_0 kt}{4\varepsilon_0 + en_0 kt} = \frac{Jt}{4\varepsilon_0 E + Jt}$, де $J = en_0 kE$ – густина струму.

Видно, що для збільшення заряду частинок необхідно збільшувати напруженість електричного поля і густину струму коронного розряду. Наявність зарядженого дисперсного матеріалу в проміжку між розпилювачем і виробом викликає замикання (зменшення) струму коронного розряду, а значить збільшує ступінь недозарядження частинок. Причому, зі збільшенням витрати порошку через розпилювач ступінь недозарядження продовжує зменшуватися. Тому для поліпшення зарядження частинок порошку слід прагнути збільшити густину струму корони. Однак тут існує обмеження, пов'язане зі швидким виникненням зворотної корони в шарі порошку, який осів на виробі, що погіршує процес зарядження. В даний час вважається, що оптимальним значенням струму коронного розряду є величина $5 \div 10$ мкА.

Розпилювачі із зовнішнім зарядженням мають найбільшу ефективність зарядження порошкового матеріалу, так як час перебування частинок в полі коронного розряду, в порівнянні з іншими пристроями, тут максимальний.

Другий варіант пристроїв для нанесення покриттів представляє собою камеру з електричним киплячим шаром, в яку розміщується виріб – 1 (рис. 7.4). Камера ділиться пористою перегородкою – 2 на дві частини. У верхню частину на пористу перегородку насипається порошковий матеріал – 3, а в нижню – подається стиснене повітря.

При певній швидкості повітря, що проходить через пористу перегородку, порошок переводиться у зважений стан, при якому частинки як би витають у висхідному потоці повітря. Через хаотичність руху частинок відбувається їх зіткнення, що приводить до статичної електризації частинок і зарядження їх як негативним, так і позитивним зарядом.

Електричне поле, створюване між високовольтним електродом, розміщеним в порошковому шарі, і заземленим виробом, викликає поділ частинок в киплячому шарі за знаками заряду. При подачі негативної напруги до високовольтних електродів позитивно заряджені частинки накопичуються навколо високовольтного електроду, а негативно заряджені – у верхній частині киплячого шару порошку. Частинки, що мають достатньо великий негативний заряд, виносяться електричним полем з киплячого шару і направляються до виробу. Через велику концентрацію частинок в киплячому шарі коронний розряд біля поверхні високовольтних електродів знаходиться в повністю замкненому стані. По мірі накопичення позитивно заряджених частинок

навколо високовольтних електродів відбувається розряд та імпульсне локальне відмикання коронного розряду, при якому здійснюється перезарядження частинок. Таким чином, в електричному киплячому шарі зарядження частинок носить складний характер, поєднує статичну електризацію частинок і зарядження в газовому розряді.

Процес транспортування частинок порошку до напилюваного виробу здійснюється в потоці повітря. При цьому співвідношення аеродинамічних і електричних сил, що діють на частинки, сильно відрізняється для різних пристроїв, що використовуються для нанесення покриттів. Якщо для розпилювачів з внутрішнім зарядженням транспортування частинок здійснюється виключно потоком повітря, то в камерах з електричним киплячим шаром напрям руху частинок до виробу створюється в основному електричним полем. Для розпилювачів із зовнішнім зарядженням переміщення частинок до виробу в рівній мірі визначається аеродинамічними і електричними силами.

При осадженні порошку на поверхню виробу, як видно зі схем пристроїв напилення, представлених на рис. 7.3 і 7.4, на частинку діє електрична сила в напрямку до поверхні виробу і аеродинамічний потік повітря, спрямований уздовж поверхні, сприяє швидше відриву частинок, ніж осадженню. Електричне поле у виробі в загальному випадку є сумою полів від напруги на високовольтних електродах і від об'ємного заряду частинок. Причому напруженість електричного поля об'ємного заряду порошку може мати значну величину, а при великій концентрації частинок навіть перевищувати напруженість поля коронного розряду, досягаючи значень 10 кВ/см. Для розпилювачів з внутрішнім зарядженням електричне поле у виробі створюється виключно об'ємним зарядом частинок. Тому, з точки зору збільшення напруженості електричного поля, доцільним є збільшення витрати порошку через розпилювач. Особливо ефективно використовувати велику (до 20 кг/год) витрату порошку при нанесенні покриттів на вироби складної форми з внутрішніми екранованими порожнинами, в які зовнішнє поле не проникає. Проте зі збільшенням витрати порошку ефективність зарядження частинок знижується, а значить зменшується електрична сила, що діє на частинки, що призводить до зниження потоку частинок, що осаджуються на поверхню виробу.

Інтенсивність процесу осадження зазвичай характеризується величиною густини потоку маси порошку

$$F = m/St,$$

де m – маса порошку, що осів на поверхню виробу площею S ; t – час напилення.

В результаті зниження потоку частинок коефіцієнт осадження порошку на виріб зменшується. Коефіцієнт осадження визначається як частка порошкового матеріалу, осадженого на виріб, по відношенню до загальної витрати матеріалу через розпилювач.

У міру наростання товщини шару порошку на поверхні виробу напруженість електричного поля в шарі зростає до пробивних значень. Виникаючі розрядні явища в шарі порошку носять назву «зворотний коронний

розряд». Час виникнення зворотної корони знаходиться з умови накопичення заряду в шарі і обчислюється за формулою:

$$t_{\text{зк}} = 2\varepsilon_{\text{ш}}\varepsilon_0 \frac{E_{\text{пр}}}{J}.$$

Тут $\varepsilon_{\text{ш}}$ – відносна діелектрична проникність порошкового шару, що обчислюється за формулою: $\varepsilon_{\text{ш}} = \varepsilon k$, де ε – відносна діелектрична проникність матеріалу напилюваного порошку; k – коефіцієнт «упаковки», який характеризує пористість шару, дорівнює відношенню товщини оплавленого покриття до товщини неоплавленого шару:

$$k = \frac{h_{\text{опл}}}{h_{\text{ш}}} = \frac{m}{h_{\text{ш}} S \gamma},$$

де γ – густина матеріалу порошку.

Так як в отриманому виразі для часу виникнення зворотної корони пробивна напруженість шару $E_{\text{пр}}$ залежить від густини струму на виріб, була отримана формула для часу виникнення зворотного коронного розряду:

$$t_{\text{зк}} = \begin{cases} 40\varepsilon_{\text{ш}} j^{-0,68} & \text{при } J < 125 \text{ мкА/м}^2 \\ 72\varepsilon_{\text{ш}} j^{-0,8} & \text{при } J > 125 \text{ мкА/м}^2 \end{cases}$$

де J в мкА/м², t в секундах.

При зворотному коронному розряді з порошкового шару зовнішнім електричним полем в простір над шаром порошку витягуються іони, протилежні за знаком зарядам осаджуючих частинок. Іони зворотної корони розряджають підлітаючі до виробу частинки, в результаті падає густина потоку маси порошку, який осідає на виріб, і сповільнюється зростання товщини шару (рис. 7.6.). При обробці експериментальних результатів, отриманих різними авторами, встановлено, що спад густини потоку маси після виникнення зворотної корони відповідає експоненціальному закону:

$$F = F_0 \exp \frac{-(t - t_{\text{зк}})}{\tau},$$

де F_0 – густина потоку маси до виникнення зворотної корони; $\tau = 1,2t_{\text{зк}}$ – еквівалентна постійна часу.

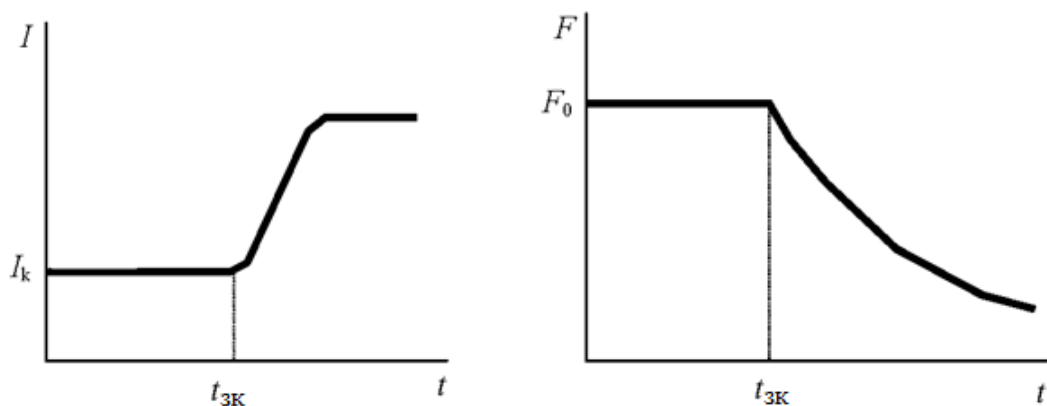


Рис. 7.6 – Залежність струму та густини потоку осаджуючих на виріб частинок наносимого порошку від часу напилення

Отриманий вираз дозволяє визначити густину потоку маси порошку, що осаджується на виріб, для будь-якого моменту часу аж до нескінченно більших

значень часу, коли існує розвинена зворотна корона і практично припиняється осадження порошку на виріб.

Крім того, поява розвинутого зворотного коронного розряду викликає утворення кратерів в порошковому шарі, що погіршує якість одержуваного оплавленого покриття. Виходячи з цього, було визначено час нанесення покриття, при досягненні якого ще не відбувається помітного зниження осадження порошку на продукт та погіршення якості кінцевого покриття. Рациональний час наплення дорівнює:

$$t_{\text{рац}} = t_{\text{зк}} + 0,5\tau = 1,6t_{\text{зк}}.$$

Знаючи рациональний час наплення і залежність для густини потоку маси, інтегруванням обчислюється маса осілого порошку і при відомій густині матеріалу визначається товщина одержуваного якісного оплавленого покриття:

$$h_{\text{опл}} = 1,47F_0t_{\text{зк}} / \gamma.$$

Відмінність при нанесенні порошкових покриттів розпилювачами з зовнішнім зарядженням полягає в тому, що порівняно з розпилювачами з внутрішнім зарядженням і камерами з електричним киплячим шаром у факелі розпорошеного порошку присутні як заряджені частинки, так і газові іони, що створюються при коронному розряді. Тому, як тільки на поверхні виробу утворюється суцільний порошковий шар, відразу відбувається його підзарядження іонами, що рухаються до виробу під дією електричного поля.

Підзарядження шару струмом коронного розряду істотно скорочує час утворення зворотної корони, що обмежує якісне фарбування екранованих ділянок виробу складної форми.

Одним із шляхів зменшення підзарядження шару порошку струмом коронного розряду є узгодження розподілу концентрації частинок в факелі розпорошеного порошку з густиною струму коронного розряду на поверхні виробу (рис. 7.7). Видно, що при узгодженому факелі спостерігається приблизно однакова густина струму коронного розряду по всьому відбитку факела на поверхні виробу, і відсутні ділянки з підвищеним підзарядженням струмом прямої корони.

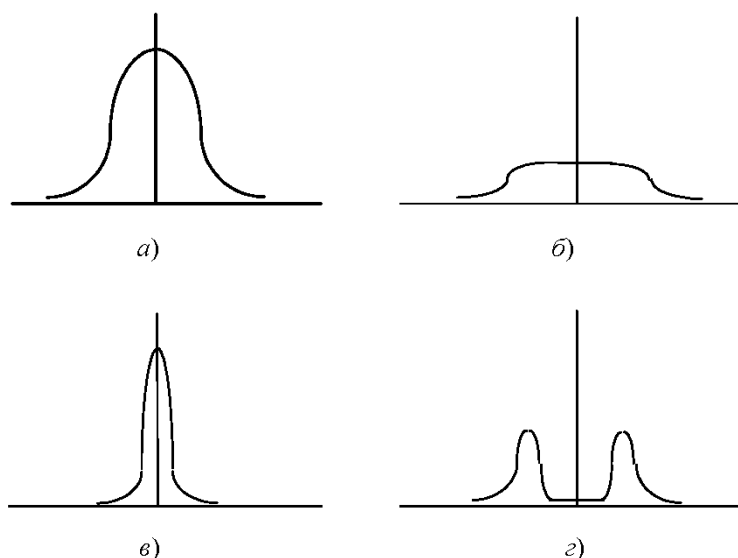


Рис. 7.7 – Розподіл густини струму по відбитку факела при
а) відсутності подачі порошку через розпилювач;

б) узгодженому факелі порошку; в) широкому факелі; г) вузькому факелі порошку

ТЕМА 8 ЕЛЕКТРОСЕПАРАЦІЯ

Лекція №9 Електросепарація матеріалів

8.1 Класифікація сепараторів

Електрична сепарація мінеральної сировини являє собою процес розділення сипучих сумішей речовин за фізичним складом, крупністю або формою з використанням енергії електричного поля. Електрична сепарація використовується для двох цілей: електричного збагачення та електричної класифікації. Електричне збагачення – процес розділення сумішей речовин по їх фізичних властивостях. Електрична класифікація – процес поділу частинок однієї речовини за розмірами частинок.

Фізичні закономірності електричного збагачення та класифікації мають загальні основи.

Трибоефект відкрив в 600 році до н.е. Фалес Мілетський, який виявив електризацію бурштину при натиранні його хутром або сукном. Однак тільки в 1881 році був зареєстрований патент на спосіб електричного поділу золота і кварцу.

Таблиця 8.1 Класифікація сепараторів

За способом сепарації:	За електропровідністю	Трибо електростатична	Піро електрична	Діелектрична (по ε)
За характеристиками поля в робочому проміжку:	-електростатична - коронна - коронно-електростатична	Електростатична		
Конструктивні ознаки:	- В тонкому шарі: барабанні, лоткові - В об'ємі: камерні, з киплячим шаром, флюїдизаційні, - Пневматичні дуттьового типу			

В даний час здійснюють збагачення: залізних, титанових, олов'яних та інших руд кольорових металів; поділ суміші порошоків, що розрізняються за фізичними властивостями.

Класифікація здійснюється при поділі азбесту і слюди за формою; алмазних порошоків за розмірами.

Класифікація електросепараторів проводиться по фізичних принципах, що становлять основу процесу поділу, та за конструктивними ознаками.

8.2 Сепарація за електропровідністю

8.2.1 Барабанні електростатичні сепаратори

На барабанних електростатичних сепараторах здійснюється поділ сипучих речовин, що мають різну питому електропровідність. На рис. 8.1 представлена конструкція такого сепаратора. Електростатичне поле створюється між некоронуючим високовольтним електродом 3 і заземленим барабаном (осаджувальним електродом) 2. Частинки поділюваних матеріалів з дозатора потрапляють на поверхню обертового барабана.

Після переміщення їх в зону електростатичного поля провідні частинки в результаті контактного зарядження набувають заряд, протилежний по знаку потенціалу високовольтного електрода.

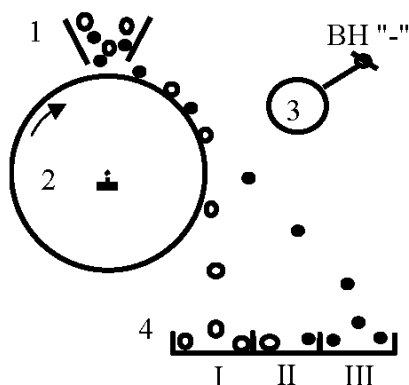


Рис. 8.1 – Схема барабанного електростатичного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – металевий заземлений барабан (осаджувальний електрод);
3 – некоронуючий високовольтний електрод; 4 – приймач для непровідних частинок I, провідних частинок III і їх суміші II

Виникаюча при цьому сила електричного поля відриває частинки від поверхні барабана і вони потрапляють в приймач III. Непровідні частинки не встигають придбати надлишковий заряд і під дією сил тяжіння падають в приймач I. В приймач II потрапляє суміш з провідних і непровідних частинок, які не пройшли розділення.

Швидкість обертання барабана складає 40÷400 об/хв. Напруженість електростатичного поля $E_{\text{ел.ст}} = 3 \div 4$ кВ/см. Продуктивність сепаратора на погонний метр довжини становить $Q \approx 2$ т/(м·год). Діаметр частинок, що сепаруються, знаходиться в діапазоні 100 мкм ÷ 3 мм.

8.2.2 Барабанні коронні сепаратори

Для більш ефективного розподілу матеріалів за провідністю стали використовувати сепаратори, у яких зарядження частинок здійснюється в полі коронного розряду. Це призводить до появи заряду на непровідних частинках, причому того ж знаку, що і коронуючий електрод.

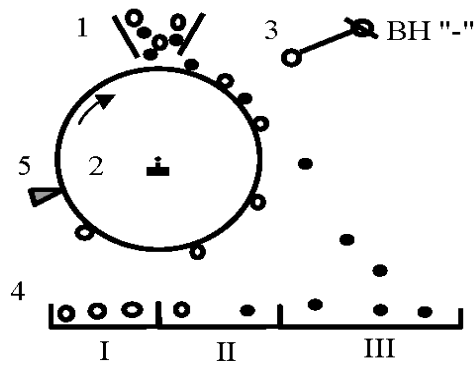


Рис. 8.2 – Схема барабанного коронного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – металевий заземлений барабан (осаджувальний електрод);
3 – коронуючий високовольтний електрод; 4 – приймач для непровідних
частинок I, провідних частинок III і їх суміші II; 5 – скребок

Тим самим, виникає електрична сила, що утримує ці частинки на поверхні барабана в зоні поділу матеріалів. Крім того, непровідні частинки утримуються на поверхні барабана силами дзеркального відображення аж до видалення їх за допомогою скребка.

В результаті розділення провідних і непровідних матеріалів відбувається на різних сторонах поверхні барабана, що забезпечує більш селективне відділення провідників від непровідників.

8.2.3 Барабанні коронно-електростатичні сепаратори

Найбільшого поширення набули коронно-електростатичні сепаратори (рис. 8.3), у яких слідом за коронуючим електродом 3 розміщується високовольтний некоронуючий електрод, що відхиляється 4. У цих сепараторах механізм зарядження частинок в зоні коронного розряду аналогічний попередньому варіанту. Введення в робочу зону додаткового електростатичного поля збільшує роль електричних сил, що сприяють більш ранньому відхиленню, провідних частинок від барабана. Частинки діелектриків, при інших рівних умовах, утримуються на більшій ділянці периметра барабана. В результаті цього збільшується різниця в траєкторіях провідних і непровідних частинок. Таким чином, електродна система є найважливішим вузлом цих сепараторів.

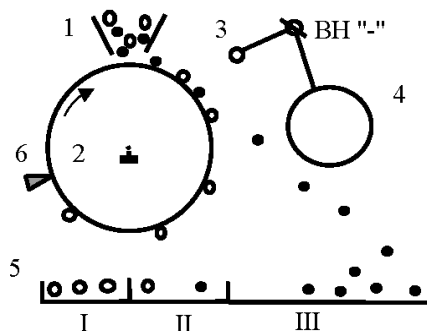


Рис. 8.3 – Схема барабанного коронно-електростатичного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – металевий заземлений барабан (осаджувальний електрод);
3 – коронуючий високовольтний електрод; 4 – відхиляючий електрод;
5 – приймач для непровідних частинок I, провідних частинок III і їх суміші II;
6 – скребок

Осаджувальні електроди виготовляють зазвичай із сталевих труб, які мають діаметр $125 \div 350$ мм і довжину до 2 м. Для зменшення впливу адгезійних сил поверхню осаджувальних електродів повинна бути гладкою, тому її хромують і полірують.

Набули поширення два типи коронуючих електродів: дровові і голчасті. Дротяні електроди виконують із ніхромового або вольфрамового дроту діаметром $0,25 \div 0,4$ мм. Голчасті електроди монтують на несучому стрижні на відстані $3 \div 6$ мм один від одного.

Конструкції електродів, що відхиляють, вельми різноманітні. На рис. 8.4. показані комбінації дровяного коронуючого електрода і різних відхиляючих електродів.

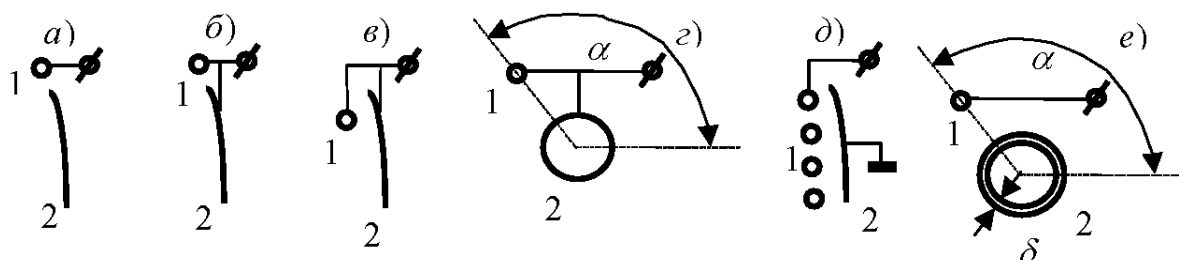


Рис. 8.4 – Схеми розташування електродів барабанних коронно-електростатичних сепараторів

- а) пластинчастий відхиляючий електрод, що заряджається від коронуючого,
 - б) пластинчастий відхиляючий електрод, що підключений до коронуючого,
 - в) пластинчастий відхиляючий електрод, що підключений до коронуючого і розташований за ним,
 - г) циліндричний відхиляючий електрод, з'єднаний з коронуючим,
 - д) система з декількома коронуючими і заземленим відхиляючими електродами,
 - е) циліндричний відхиляючий електрод, покритий шаром з діелектрика товщиною δ , що заряджається від коронуючого.
- 1 – коронуючий електрод, 2 – відхиляючий електрод.

Наявність обертових деталей і частин, які мають тертя, що працюють в запиленій атмосфері, викликає їх швидке зношення. Крім того, ці сепаратори мало ефективні при поділі тонкоподрібненого матеріалу крупністю нижче $50 \div 70$ мкм внаслідок адгезійної взаємодії мінеральних частинок між собою та з поверхнею барабана.

8.2.4 Лоткові похилі електростатичні сепаратори

Дані типи сепараторів знайшли широке застосування при поділі титановмісних руд. Сепаруючі матеріали з бункера 1 (рис. 8.5) потрапляють на похилу площину, розташовану під кутом $20^\circ \div 42^\circ$ до горизонталі.

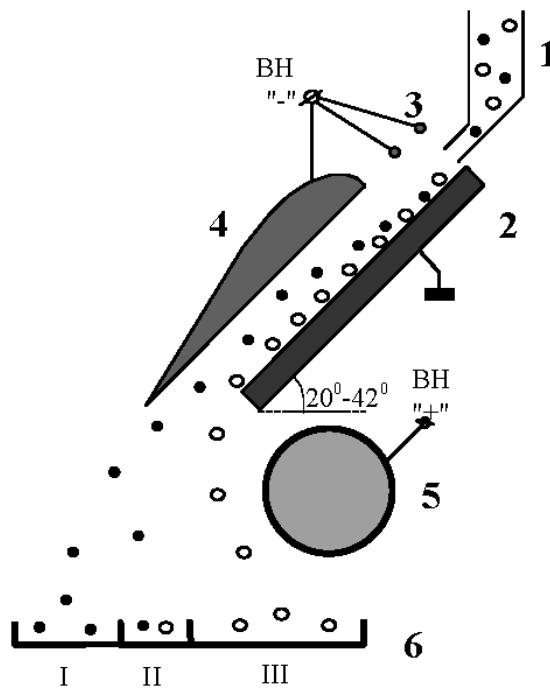


Рис. 8.5 – Конструкція лоткового похилого електростатичного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – пластинчастий похилий (осаджувальний) електрод;
3 – коронуючий електрод; 4 – відхиляючий електрод

Зковзаючи по заземленого лотку спочатку в поле коронного розряду, створюваному між електродами 3 і 2, а потім в електростатичному полі, утвореному електродами 4 і 2, провідні частинки рутилу (TiO_2) заряджаються позитивно і концентруються у верхній частині шару. Непровідні частинки циркону заряджаються негативно і концентруються в нижній частині шару. Електростатичне поле сприяє кращому поділу частинок. Для кращого розподілу частинок мінералів під похилою площиною розміщують додатковий відхиляючий електрод 5, на який подають високу напругу позитивної полярності. На процес сепарації істотно впливають довжина і кут нахилу заземленого електрода 2. Для зменшення впливу адгезійних сил і контактного опору між поверхнею заземленого електрода і частинками пластинчастий електрод виготовляється з графітовмісного матеріалу.

Продуктивність сепаратора досягає $Q=3 \text{ т}/(\text{м} \cdot \text{год})$.

Для барабанних і лоткових сепараторів питома електропровідність поділюваних матеріалів повинна відрізнятися на 2÷4 порядки.

8.3 Трибоелектростатична сепарація

Для поділу матеріалів, що мають низьку електропровідність і які розрізняються трибоелектричними зарядами, електризацію частинок виконують:

- або при терті частинок між собою,
- або при терті частинок об спеціальну поверхню трибоелектризуючого елемента.

Барабанні трибоелектростатичні сепаратори

У представленого на рис. 8.6 барабанного трибоелектростатичного сепаратора зарядження частинок поділюваних матеріалів здійснюється на похилій площині 2 за рахунок трибоелектризації при їх контакті з поверхнею площини.

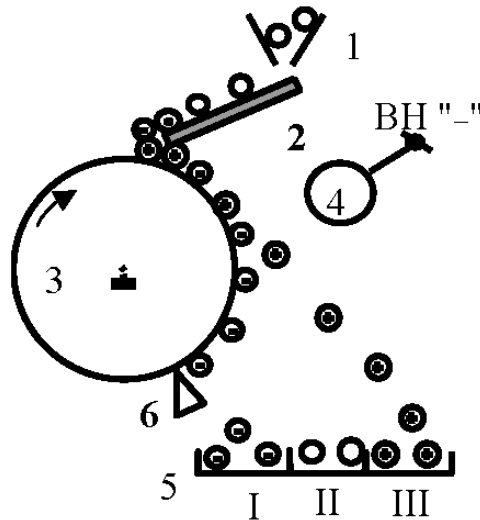


Рис. 8.6 – Схема барабанного трибоэлектростатического сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – електризуючий елемент; 3 – металевий заземлений барабан (осаджувальний електрод); 4 – некоронуючий високовольтний електрод; 5 – приймач для негативно заряджених частинок I

Підбираючи матеріал площини можна регулювати знак заряду, що набувається частинками. Крім того, встановлено, що подача на металеву пластину високої напруги позитивної або негативної полярності (в залежності від властивостей поділених матеріалів) може значно збільшити трибоелектричний заряд. Різноманітні заряджені частинки надходять в електростатичне поле, створюване між електродами 3 і 4, де відбувається їх розділення. Позитивно заряджені частинки під дією електричного поля відриваються від поверхні барабана і потрапляють в приймач 5 (III). Негативно заряджені частинки скребком 6 зчищаються в приймач 5 (I).

Камерні електростатичні сепаратори вільного падіння

Після зарядження матеріал, що розділяється, надходить з дозатора в зону з електростатичним полем. Поле створюється вертикально розташованими некоронуючими електродами. Падаючи вниз під дією сил тяжіння, частинки відхиляються в бік електродів під дією кулонівських сил.

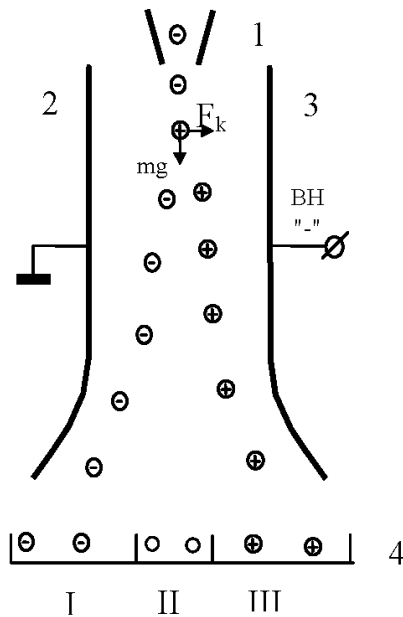


Рис. 8.7 – Схема камерного електростатичного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – заземлений електрод; 3 – високовольтний електрод;
4 – приймач сепарованих матеріалів (I – негативно зарядженого,
II – незарядженого і III – позитивно зарядженого)

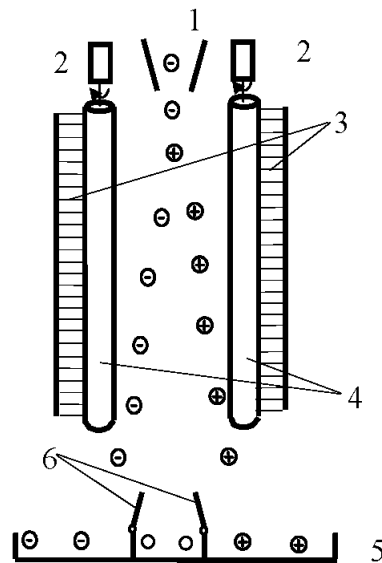


Рис. 8.8 – Схема камерного трубчастого електростатичного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – електродвигун; 3 – щітки для очищення осаджувальних
електродів; 4, 5 – приймач сепарованих матеріалів; 6 – відсікаючі шибери

Напрямок дії електричної сили залежить від знаку надлишкового заряду частинки. На рис. 8.7 наведена схема камерного електростатичного сепаратора. Розширення міжелектродної відстані в нижній частині сепаратора дозволяє розширити віяло поділюваних матеріалів і поліпшити таким чином їх сепарацію. Перевагою даного типу сепараторів є велика продуктивність, так як процес поділу частинок матеріалу здійснюється не на поверхні електроду, а в міжелектродному просторі. Недоліком даної конструкції є поступове накопичення шару частинок в результаті осадження частинок на електроди.

При утворенні на електроді шару пилу певної величини він відвалюється від електрода і частина відсепарованого матеріалу потрапляє в непридатні хвости.

Для запобігання накопичення осівших частинок виконують очистку осаджувальних електродів. На рис. 8.8 представлена конструкція камерного електростатичного сепаратора фірми «Калі унд Зальц АГ» (Німеччина). Осаджувальні електроди сепаратора представляють собою два ряди паралельно встановлених вертикальних обертових (навколо своєї вісі) труб. Вони очищаються від налиплого пилу нерухомими щітками, укріпленими паралельно трубам з тильного боку. Промислові сепаратори такого типу мають робочу довжину електродів 10 м, відстань між електродами 250 мм. Напруженість електростатичного поля $4 \div 5$ кВ/см. Питома продуктивність сепаратора складає $10 \div 30$ т/(м·год).

Сепаратори з киплячим шаром (трибоелектростатичні флюїдизаційні сепаратори)

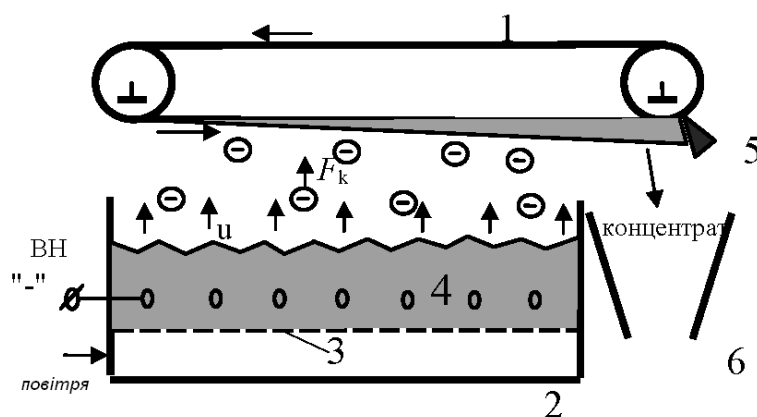


Рис. 8.9 – Схема сепаратора з киплячим шаром, де
1 – транспортер з провідною заземленою стрічкою; 2 – ванна з пористою перегородкою; 3, 4 – киплячий шар порошку; 5 – скребок;
6 – прийомний бункер для концентрату

Сепаратор складається з флюїдизаційної ванни 2 (рис. 8.9), яка має пористу перегородку 3 з шаром 4 суміші порошкових матеріалів, що підлягають сепарації. Через пористу перегородку в ванну подають висхідний потік повітря і частинки порошку переводяться у зважений стан. Частинки заряджаються при зіткненні одна з одною. У ванні на деякій відстані від пористої перегородки встановлені дріт'яні електроди, до яких підводиться висока напруга.

Електростатичне поле, створюване між високовольтними електродами і провідною заземленою стрічкою транспортера 1, витягає з киплячого шару частинки одного з поділюваних матеріалів, заряджені тим же знаком, що і потенціал високовольтних електродів. Осідаючи на провідну стрічку транспортера, частинки утримуються силами дзеркального відображення аж до моменту видалення їх скребком 5 в бункер для концентрату. Частинки іншого з поділюваних матеріалів, заряджені протилежним зарядом, концентруються

близько високовольтних електродів і періодично розвантажуються з ванни через зливні отвори.

8.4 Піроелектрична сепарація

Деякі кристалічні матеріали при нагріванні і при різкому охолодженні електризуються.

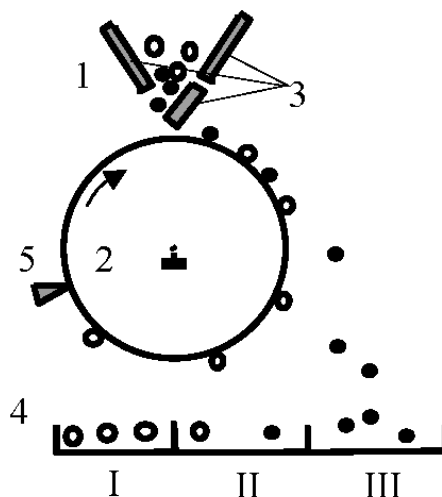


Рис. 8.10 – Схема барабанного піроелектричного сепаратора, де
1 – дозатор; 2 – металевий заземлений барабан (осаджувальний електрод);
3 – електронагрівачі; 4 – приймач для електризованих частинок

Для реалізації цього виду зарядження за допомогою барабанних сепараторів (рис. 8.10) стінки бункера-дозатора 1 виконані у вигляді нагрівних елементів 3. Нагрітий матеріал, попадаючи на холодну поверхність барабана 2, швидко охолоджується. Кристалічні матеріали, схильні до піроелектризації заряджаються і утримуються на поверхні барабана силами дзеркального відображення аж до видалення їх скребком 5 в приймач I. Частинок інших матеріалів не заряджаються, відриваються від поверхні барабана і потрапляють в приймач III.

8.5 Діелектрична сепарація

Діелектрична сепарація заснована на різниці в значеннях і напрямках пондеромоторних сил, діючих на поляризовані частинки твердих тіл в неоднорідному електричному полі. Пондеромоторна сила дорівнює:

$$F = 2\pi\epsilon_0\epsilon_2a^2 \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \text{grad}E^2,$$

де ϵ_1 – відносна діелектрична проникність частинки, ϵ_2 – відносна діелектрична проникність середовища, a – радіус сферичної частинки, E – напруженість електричного поля.

У діелектричних сепараторах розділюючий дисперсний матеріал подають в неоднорідне електричне поле, створюване електродами різної конфігурації. Поділ здійснюють у рідкому, рідше в повітряному, непровідному середовищі.

Поведінка частинок визначається різницею діелектричної проникності частинки ϵ_1 і середовища ϵ_2 .

У тому випадку, коли $\varepsilon_1(1) > \varepsilon_2$ частинка втягується в область з найбільшою напруженістю електричного поля, якщо ж $\varepsilon_1(2) < \varepsilon_2$ частинка виштовхується з цієї області. Практично для будь-якої пари мінералів та інших речовин можна підібрати умови, за яких вони розділяються.

Робочий простір сепараторів заповнюють рідким середовищем, що складається з двох змішуючих компонентів, діелектричну проникність якої можна регулювати в широких межах, змінюючи співвідношення складових частин. В якості середовища використовують суміші: гас – нітробензол, скипидар – нітробензол, чотирьоххлористий вуглець – метиловий спирт, гексан – ацетон, гас – диметилформаїд та ін. Таким чином, вдається отримати необхідне співвідношення між відносними питомими електричними постійними середовища і частинок.

У діелектричних сепараторах застосовують, як правило, ізольовані дрітні електроди, на які подають високу напругу змінної полярності промислової частоти для виключення зарядження і налипання частинок на електроди.

Конструкції діелектричних сепараторів поділяють на такі види: щілинного типу (проводи в діелектричних пазах); з направляючою площиною (діелектричні пластини з прорізами між плоскими електродами); з просторовим розташуванням електродів, при сепарації в повітряному середовищі.

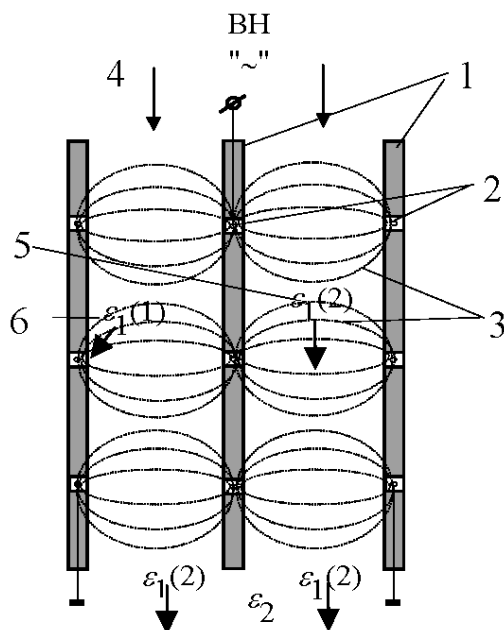


Рис. 8.11 – Схема діелектричного сепаратора щілинного типу (проводи в діелектричних пазах), де 1 – діелектричні площини; 2 – проводи в пазах; 3 – силові лінії; 4 – потік поділюваних частинок; 5 – частинки з $\varepsilon_1(2) < \varepsilon_2$; 6 – частинки з $\varepsilon_1(1) > \varepsilon_2$

У діелектричних сепараторах щілинного типу (рис. 8.11) дротові електроди 2 монтують в вертикально встановлені діелектричні пластини 1. При вільному падінні в рідкому середовищі частинки мінералів з діелектричною проникністю більше такої у середовища втягуються в область найбільшої напруженості. Частинки, що мають діелектричну проникність меншу, ніж у середовища, залишаються в області з найменшою напруженістю електричного поля і осідають в рідині, не відхиляючись до діелектричних пластин.

ТЕМА 9 ЕЛЕКТРОДРУК

Лекція №10 Процеси електродрукування

9.1 Застосування електродруку

Електростатичні друкуючі пристрої використовуються в якості пристроїв копіювально-розмножувальної техніки, в якості вивідних пристроїв ЕОМ, в системах автоматизованого проектування, інформаційно-вимірювальних системах, в якості маркуючих пристроїв та при нанесенні структурних покриттів. В електродруці виділяються два напрямки: електрофотографія і електрокрапелеструменева технологія. Електрофотографічні пристрої забезпечують більш високу швидкість та роздільну здатність друку, електрокрапелеструменеві більш прості по влаштуванню і дешеві.

9.2 Електрофотографія

В основі електрофотографічного способу лежить властивість високо-опірного фотонапівпровідника, нанесеного тонким шаром на підкладку, змінювати свою електричну провідність під дією світла.

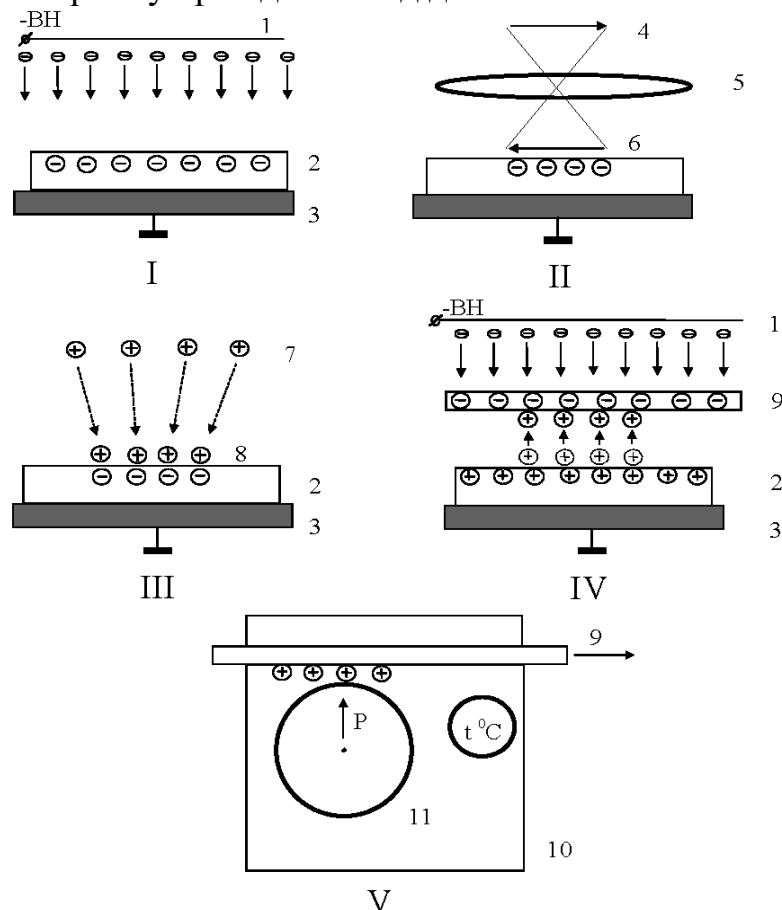


Рис. 9.1 – Стадії електрофотографічного процесу, де

I – зарядження; II – експозиція; III – проявлення;

IV – перенесення зображення; V – фіксація зображення;

1 – коронуючі електроди; 2 – фотонапівпровідник; 3 – заземлений електрод;

4 – оригінал (первинне зображення); 5 – проекційна система; 6 – приховане електростатичне зображення; 7 – проявляючий порошок; 8 – порошкове зображення; 9 – папір; 10 – термокамера; 11 – притискний валик

На першій стадії процесу (рис. 9.1) проводиться електризація напівпровідника, тобто на поверхню напівпровідникового шару наносяться електричні заряди того чи іншого знаку. Постійна часу розряду шару, обумовлена діелектричною проникністю і електричною провідністю шару, така, що заряди утримуються на поверхні протягом часу, необхідного для виконання наступних операцій. Електризація проводиться при відсутності освітлення.

Після електризації виконується експонування шару, яке принципово не відрізняється від експонування звичайних фотографічних матеріалів. Воно може здійснюватися в фотографічних камерах, а також контактним методом. В процесі експонування завдяки фотопровідності напівпровідника зменшується опір шару і відбувається стікання зарядів з тих ділянок поверхні, які піддалися впливу світла.

Залишившись після експонування, поверхневий заряд утворює приховане електростатичне зображення.

Проявлення прихованого електростатичного зображення проводиться за допомогою зарядженого порошку. Якщо заряд частинок проявляючого порошку протилежний за знаком залишковому поверхневому заряду, то частинки будуть осідати переважно в місцях з найбільшою густиною поверхневого заряду. В результаті на поверхні напівпровідникового шару утворюється порошкове зображення. Електростатичне зображення можна візуалізувати не тільки зарядженими порошками, але і безпосередньо скануванням потенційного рельєфу і перетворенням його в оптичне зображення на екрані електронно-променевої трубки.

Наступним етапом процесу є перенесення шару на несвітлочутливу підкладку, наприклад, папір. Далі проводиться фіксація порошкового зображення на папері. Зазвичай на папір переноситься незначна частина порошку, що дозволяє отримувати кілька копій з одного зображення на напівпровідниковому шарі. Найбільш простий і поширений спосіб фіксації зображення термічний при відповідному підборі порошку.

Заключною стадією процесу є очищення напівпровідника від залишків порошку.

З усього розмаїття фото-напівпровідникових матеріалів в електрографії знайшли застосування оксид цинку і селен. Вони найбільшою мірою задовольняють вимогам: мають малу електричну провідність ($10^{-13} \div 10^{-14}$ 1/Ом·м), мають необхідну спектральну чутливість, дозволяють отримувати тонкі шари, мають достатню механічну міцність. Широко використовуються органічні напівпровідники.

Застосовуються різні методи отримання електрографічних шарів. Наприклад, шари оксиду цинку отримують шляхом нанесення тонкого шару суспензії порошку на папір і подальшого висушування. Такі шари призначені для одноразового використання. Вони мають найбільшу роздільну здатність (до

100 ліній на 1 мм), забезпечують якісне зображення з передачею півтонів, але чутливість їх мала.

Шари з селену наносять на металеві пластини напиленням у вакуумі, і призначені вони для отримання багаторазових копій. Роздільна здатність при цьому виходить в $2 \div 3$ рази менше, але чутливість шарів на основі селену може бути значно збільшеною.

Розглянемо основні стадії електрографічного процесу.

З різних способів зарядження напівпровідникових шарів застосовується переважно зарядження в полі коронного розряду. Коронуючі електроди являють собою або тонкі вольфрамові дроти діаметром $0,02 \div 0,1$ мм, або голки. Важливе значення має рівномірність розподілу заряду по шару. Це досягається застосуванням ряду проводів або голок замість одного проводу, переміщенням шару щодо коронуючих проводів, використанням додаткових екранів.

В електрофотографії використовуються декілька способів проявлення прихованого електростатичного зображення. За характером взаємодії частинок проявляючої речовини із зарядженими ділянками шару розрізняють два основних типи проявлення: сухе і рідинне.

Є багато різновидів сухого методу проявлення: каскадний, «магнітним пензлем», хутряними валиками, аерозольний. Метод сухого каскадного проявлення найбільш поширений для селенових фотошарів багаторазового використання. Каскадний проявник зазвичай складається з двох компонентів: грубозернистого носія і дрібнодисперсного проявляючого порошку – тонера.

Речовини-носії для даного проявляючого порошку вибираються таким чином, щоб при терті частинок носія з частинками тонера, останні набували заряди, протилежні за знаком зарядам електростатичного зображення. Розміри частинок тонера зазвичай складають $5 \div 10$ мкм, частинки носія досягають $300 \div 700$ мкм. Від розміру частинок тонера залежить якість одержуваного зображення. При дуже малому розмірі різко підвищується оптична густина фону (вуаль) зображення. При проявленні зображення носій забезпечує рівномірне переміщення проявляючого складу по поверхні шару. Завдяки контактній-електричній взаємодії на кожній частинці носія утримується значна кількість частинок тонера.

Проявлення полягає в тому, що частинки тонера відриваються від носія і осідають на заряджених ділянках шару. В якості носіїв застосовують кварцовий пісок, скляні кульки, полістирол. Саме широке поширення одержали скляні кульки, вкриті плівкою смоли. Скляні або полістирольні кульки легко перекочуються по пластині і менше дряпають шар, ніж кварцовий пісок.

Каскадний спосіб проявлення використовується в більшості вітчизняних і зарубіжних моделей копіювально-розмножувальних апаратів. В основному каскадний спосіб проявлення застосовують при копіюванні штрихових зображень. Незважаючи на ряд таких переваг, як мала витрата проявляючого порошку, прийнятний рівень вуалі, відсутність пилу, каскадний метод проявлення має серйозні недоліки, які полягають в тому, що він не забезпечує високу ступінь проявлення, погано проявляє напівтонові зображення, тобто дає так званий «Крайовий ефект».

У методі проявлення «магнітним пензлем» також застосовуються носії і проявляючий порошок, але частинки носія мають магнітні властивості. Притягаючись до магніту, вони розташовуються нитками уздовж силових ліній поля. При переміщенні електрофотографічного шару щодо «магнітної кисті» відбувається проявлення електростатичного зображення, яке за механізмом не відрізняється від каскадного проявлення.

У методі аерозольного проявлення доставка частинок до поверхні електрофотошару здійснюється потоком повітря. Використовуються високодисперсні порошки з розміром частинок $0,1 \div 1,0$ мкм, що дає можливість отримувати зображення з дуже високою роздільною здатністю. Аерозольний метод дозволяє отримувати не тільки штрихові, але і напівтонові відбитки.

Конструктивне оформлення установки для аерозольного проявлення багато в чому подібно оформленню установок для напилювання порошкових покриттів в електричному полі.

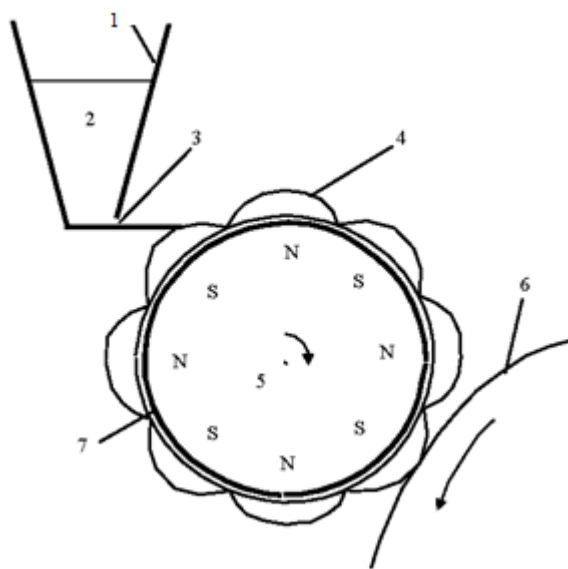


Рис. 9.2 – Схема вузла проявлення з однокомпонентним проявником, де
1 – бункер; 2 – проявник; 3 – діафрагма, 4 – магнітна кисть;
5 – магнітний барабан; 6 – електрофотошар; 7 – проявляючий барабан

Останнім часом багато фірм приділяють увагу електрофотографічному процесу з використанням однокомпонентного проявника, який має ряд істотних переваг у порівнянні з електрофотографічним процесом, в якому використовують двокомпонентний проявник. Основними з них є: простота конструкції пристроїв проявлення, закріплення і очищення, значне зменшення енергоємності при закріпленні зображення, зменшення матеріалоємності устаткування, підвищення його експлуатаційних характеристик.

На відміну від традиційного двокомпонентного проявника однокомпонентний являє собою однорідний проявляючий порошок, кожна частинка якого містить феромагнітну компоненту у вигляді ядра або окремих вкраплень. Проявник, що має магнітні властивості, використовується при прояві методом «магнітної кисті» без застосування електрофотографічного носія.

Вузол проявлення «магнітним пензлем» з однокомпонентним носієм конструктивно значно простіше (рис. 9.2) аналогічних вузлів, де використано двокомпонентний проявник. Процес проявлення методом «магнітної кисті» відбувається наступним чином.

Частинки проявника 2 через діафрагму 3 під впливом магнітного поля обертового магнітного барабана 5 потрапляють на поверхню немагнітного проявляючого барабана 7 і утворюють магнітну кисть 4, конфігурація якої визначається конфігурацією формуючого її магнітного поля. При використанні симетричного багатосмугового барабана кисть формується у вигляді симетричної багатопелюсткової системи з числом пелюсток рівним кількості полюсів барабана. Кожна пелюстка магнітної кисті – це сукупність ланцюжків з частинок проявника, витягнутих у будь-який момент часу вздовж силових ліній магнітного поля. Довжина ланцюжків, густина їх розподілу по поверхні проявляючого барабана визначаються магнітними властивостями проявника, величинами магнітної індукції поля та його градієнта.

При переміщенні магнітної кисті по поверхні фотошару частинки проявника притягуються зарядами прихованого електростатичного зображення (рис. 9.3).

Істотним недоліком проявлення зарядженими порошками є "крайовий ефект", який полягає в тому, що при прояві великих рівномірно заряджених площ виходить контурне зображення. Причиною цього є те, що електричне поле, створюване зарядами електростатичного зображення і пов'язаними з ними зарядами на підкладці, виходить за межі шару тільки на краях зображення, де і відбувається переважне осадження частинок порошку. У найменшій мірі «крайовий ефект» виражений при аерозольному методі проявлення. Для ослаблення «крайового ефекту» застосовують додаткові електроди, розташовані в безпосередній близькості над електрофотографічним шаром, і шари з регулярними неоднорідностями.

Сутність перенесення порошкового зображення полягає в тому, що частинки тонера, з яких складається видиме зображення, можуть бути після проявлення перенесені електростатичним полем на папір. Для цього на папір, накладений на фотошар, наносять заряди, що збігаються за знаком з початковим зарядом шару.

Для проявлення і закріплення зображення застосовують і рідинні проявники. В цьому випадку використовують трибоелектричний ефект, що спостерігається між порошком тонера і рідиною з низькою електричною провідністю, наприклад, бензином, гасом і т.д. Щоб частинки тонера весь час знаходилися в підвішеному стані в рідині, її постійно перемішують. Експонування електрофотографічного шару проводиться через шар рідинного проявника. При цьому тонер відкладається в тих місцях, де є заряди, і відразу ж закріплюється за допомогою того ж розчинника. Цей метод дозволяє отримати відбитки з максимально можливою для електрофотографії роздільною здатністю – 200÷250 ліній на 1 мм.

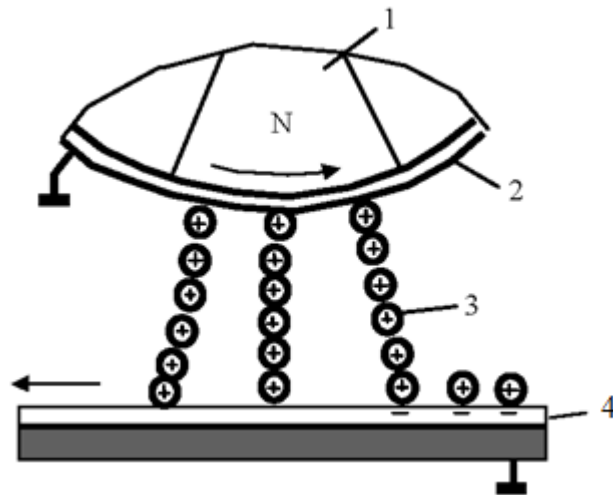


Рис. 9.3 – Схема процесу проявлення з провідним однокомпонентним проявником, де 1 – магнітний барабан; 2 – проявляючий барабан; 3 – частинки проявника; 4 – електрофотошар

Якість зображення при використанні рідинних проявників значно вище, ніж при сухому проявленні. Причина цього полягає в тому, що в рідинному проявнику всі частинки тонера мають однаковий зарядом на протигагу сухому проявленню. В результаті при сухому проявленні частинки осідають і на освітлених ділянках шару, утворюючи фон зображення.

9.3 Електрокраплеструменевий друк

В електрокраплеструменевих пристроях використовується принцип електростатичного управління струменем монодисперсних заряджених крапель за аналогією з електронно-променевим осцилографом або дисплеєм.

Емітер крапель генерує однорідну прямолінійну крапельну струю, яка отримує індукційне або іонне зарядження крапель в зарядному пристрої. Блок управління відхиляє струмінь по одній або двом координатам, перериває і очищає її від сателітів (крапель меншого розміру). Для забезпечення якісного процесу друку емісія крапель, їх зарядження і керування повинні бути синхронними. Цю функцію виконує синхронізуючий пристрій. Механізм приводу здійснює взаємне переміщення друкуючої головки і підкладки.

Електрокраплеструменеві пристрої мають ряд переваг: простота конструкції за рахунок одно-стадійного друку, висока надійність завдяки відсутності в друкуючій голівці механічних рухомих елементів, велика швидкість друку. Швидкість друку при послідовному формуванні знаків у вигляді матриці точок 5x7 перевищує 1000 знаків у секунду.

Спосіб емісії крапель імпульсним тиском полягає у викиді з сопла однієї краплі чорнила на кожен імпульсну зміну тиску всередині камери з чорнилом. Краплеутворення відбувається в тому випадку, якщо тиску в імпульсі достатньо для подолання сил поверхневого натягу в капілярному соплі та придбання краплею кінетичної енергії для відриву її від сопла.

У способі емісії крапель високим тиском із сопла з великою швидкістю (20 м/с) викидається струмінь провідного чорнила, який на деякій відстані від

сопла дробиться на краплі. П'єзоелектричний перетворювач модулює швидкість витікання струменя і тим самим синхронізує дроблення струменя на краплі. Цей спосіб дозволяє отримати найбільшу швидкість електрокраплеструменевого друку.

Нарешті, третій спосіб – емісія крапель електричним полем – реалізується за аналогією з електростатичним розпиленням рідини при електрофарбуванні, але з тією відмінністю, що в якості електрода використовується капіляр.

Привабливим в цьому способі є простота конструкції друкуючої головки, так як в ній відсутнє поєднання високого тиску з високочастотною вібрацією. Основною проблемою є забезпечення стабільного розміру та заряду крапель при розпилюванні.

Як приклад на рис. 9.4 представлена схема електрокраплеструменевого маркувального модуля з емісією крапель високим постійним тиском і ультразвуковою синхронізацією.

Модуль складається з генератора крапель, що включає форсунку 3, змінного соплового елемента 4, пакета п'єзокерамічних дисків 11 і генератора синхронізації 9, зарядного пристрою, що включає генератор імпульсів напруги 10, що живить індукційний електрод 5, системи відхиляючих електродів 6, що містять постійне від часу електростатичне поле, пневмогідробак для прийому фарби 1, бак для подачі фарби 2.

Під дією постійного тиску p величиною 100 кПа відбувається витіснення фарби з бака 2 через форсунку 3 та соплового елемента 4, що являє собою наконечник медичної голки, в який запресований часовий камінь з каліброваним отвором. Якщо на форсунку не чинити збудливий вплив, то потік фарби являє собою суцільний ламінарний струмінь. При подачі на п'єзокерамічні диски напруги синхронізації п'єзокераміка починає відчувати осьові коливання і рідина на виході з сопла впливає з пульсуючою швидкістю. Перетяжки, що з'являються в струмені, приводять до дроблення її на краплі однакового розміру.

Поява крапель відбувається з частотою синхронізації, яка визначається напругою U_c . Якщо краплі при проході через зарядний пристрій не заряджаються (напруга на електроді 5 відсутня), то краплі уловлюються уловлювачем 7. Краплі, які отримали заряд при відриві від струменя по індукційному механізму, відхиляються в поле електродів 6 і утворюють відбиток на підкладці 8. Величина заряду краплі визначає положення відбитка по одній координаті. Положення відбитка по другій координаті змінюється за рахунок механічного переміщення підкладки.

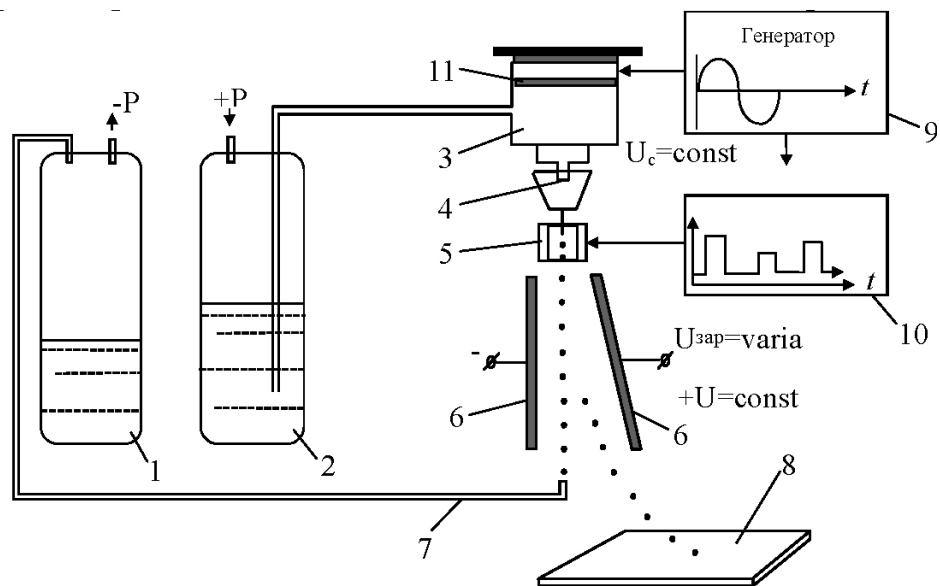


Рис. 9.4 – Схема електрокраплеструменевого маркувального модуля, де
 1 – бак прийому фарби; 2 – бак для подачі фарби; 3 – форсунка; 8 – підкладка,
 на яку наноситься фарба; 9 – генератор синхронізації; 4 – сопловий елемент;
 5 – зарядний пристрій; 6 – електроди, що створюють відхиляюче поле;
 7 – уловлювач для незаряджених крапель; 10 – генератор імпульсів напруги;
 11 – пакет п'єзокерамічних дисків.

ТЕМА 10 НЕЙТРАЛІЗАЦІЯ ЗАРЯДІВ СТАТИЧНОЇ ЕЛЕКТРИКИ

Лекція №11 Процеси нейтралізації небезпечних зарядів статичної електрики

10.1 Основні поняття

Статична електризація – це процеси, які призводять до утворення, поділу та накопичення зарядів різних знаків. Такі взаємодії стали привертати увагу дуже давно, але останнім часом це стало особливо актуальним, так як в промисловості стали застосовувати матеріали з високим питомим об'ємним опором

$\rho_v \approx 10^{12}$ Ом·м і питомою поверхневим опором $\rho_s \approx 10^{12}$ Ом. Ці матеріали можуть зберігати заряд протягом тривалого часу, а значить, може накопичуватися заряд, який збільшує напруженість електричного поля. При цьому можуть виникнути умови, які призводять до виникнення самостійного розряду, а значить, може утворитися електрична іскра (пробій проміжку).

Статична електризація, таким чином, може призводити до наступних наслідків:

- виникнення розрядів і небезпеки вибуху або пожежі;
- електричний розряд не відбувається, але утворюється електричне поле, яке може впливати на технологічний процес (у текстильній промисловості – розпуск ниток в пучку до діаметра 1 м, що ускладнює процес прядіння, в поліграфії – злипання аркушів паперу при друкуванні книг, що призводить до появи браку);
- вплив на організм людини як мікророзрядів, так і електричних полів;
- використання зарядів статичної електрики для реалізації технологічних процесів (зарядження в електросепарації, при нанесенні порошкових полімерних покриттів і т.д.).

Далі будемо розглядати небезпечні прояви статичної електрики. Небезпечні умови створюються, якщо:

- в певному місці відбувалося накопичення заряду;
- заряди створюють електричне поле, достатнє для розвитку розряду;
- енергія, що виділяється в каналі розряду, виявляється більше, ніж мінімально необхідна енергія для займання середовища.

Ці умови не завжди і не скрізь виконуються, але тим не менше в багатьох технологічних процесах ця ймовірність велика. Одним з таких процесів є перекачування нафти і нафтопродуктів трубопроводами.

10.2 Статична електрика при перекачуванні нафти по трубопроводах

10.2.1 Фізика утворення і накопичення заряду

При зіткненні двох тіл, що відрізняються фазовим станом, утворюється подвійний електричний шар. Розрізняють три причини утворення подвійного електричного шару:

- 1) переважне переміщення носіїв зарядів з одного тіла в інше – дифузія;
- 2) на межі розділу мають місце абсорбційні процеси, коли заряди однієї з фаз переважно осідають на поверхні іншої фази;

3) має місце поляризація молекул хоча б однієї з фаз. Це призводить до поляризації молекул іншої фази. Причому поляризація в другій фазі може бути розмитою (дифузною).

Подвійний електричний шар залежить від питомого опору речовини. Чим більше опір речовини, тим більш розмитим в глибину є подвійний електричний шар.

Якщо розглядати перекачку нафти, то розмитий подвійний електричний шар може заноситися переміщенням нафти і накопичуватися в бункері. Чим більше швидкість переміщення нафти, тим більше електризація нафти.

Величина зарядів статичної електрики істотно залежить від умов, в яких відбувається електризація і, зокрема, від того, що поверхні дотичних тіл можуть бути «забруднені» іншими речовинами. Тому основою кількісного аналізу є експеримент або, в кращому випадку, розрахунково-експериментальні дослідження.

10.2.2 Технологічний процес транспортування нафти

Статичне зарядження палив стало різко виявлятися приблизно з 60-х – 70-х років, коли почало застосовуватися чисте паливо для поліпшення економічності роботи та ресурсу двигунів. На рис.10.1 показано технологічний ланцюжок транспортування нафти.

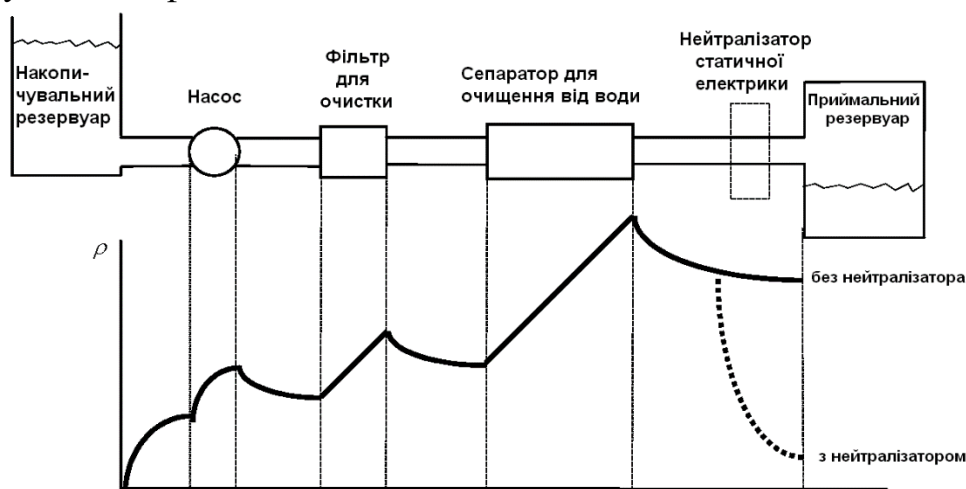


Рис. 10.1 – Наростання густини заряду в нафті при проходженні по тракту

Наростання густини заряду в нафті відбувається в технологічних пристроях, де здійснюється контакт нафти з матеріалами, що призводить до її зарядження, і де збільшується швидкість течії нафти. Спад заряду спостерігається при переміщенні нафти по заземленим трубопроводам.

При переміщенні нафти з технологічного тракту аж до приймального резервуару небезпеки від накопичення заряду статичної електрики практично немає, так як повітряних проміжків в апаратах тут немає і немає можливості виникнення електричного пробоя в газі. Інша ситуація існує в приймальному резервуарі, де обов'язкова наявність газового простору над поверхнею нафти.

Заряд, що накопичується в приймальному резервуарі, можна визначити з умов його збільшення за рахунок втікання в резервуар зарядженої нафти з урахуванням релаксації (стікання) заряду на заземлені конструкції резервуару:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{заг}} = \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{вх}} + \left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{релакс}}$$

Тут релаксація заряду відбувається по експоненційній залежності:

$$Q(t) = Q_0 e^{-t/\tau},$$

де $\tau = \varepsilon \varepsilon_0 / \gamma_v$ – постійна часу релаксації, а ε і γ_v – відповідно відносна діелектрична проникність і провідність нафти.

Звідси:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{релакс}} = -\frac{Q_0}{\tau} e^{-t/\tau}$$

Перепишемо вихідне рівняння, враховуючи, що $\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}$, де $I_{\text{вх}}$ – струм зарядів статичної електрики на вході в резервуар:

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{заг}} = I_{\text{вх}} - \frac{Q}{\tau}$$

Рішенням диференціального рівняння є:

$$Q = I_{\text{вх}} \tau (1 - e^{-t/\tau}).$$

На рис. 10.2 наведено залежності зміни густини та сумарного об'ємного заряду нафти в приймальному резервуарі.

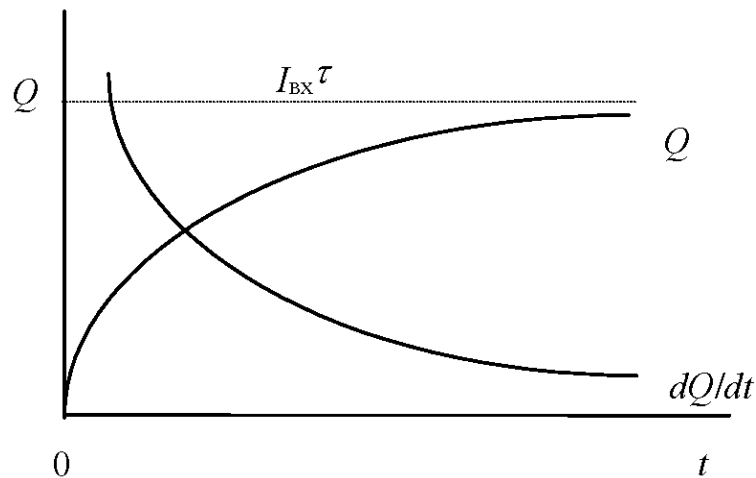


Рис. 10.2 – Залежність сумарного об'ємного заряду нафти в приймальному резервуарі від часу наповнення

Із залежностей видно, що швидкість росту заряду експоненційно падає, а сумарний об'ємний заряд, збільшуючись, експоненційно прагне до граничного значення, що визначається добутком $I_{\text{вх}} \tau$.

Тому для зменшення заряду, що накопичується в приймальному резервуарі, є два шляхи. Перший полягає в зниженні постійної часу релаксації шляхом додавання в нафту спеціальних присадок, що збільшують її провідність. Даний напрямок вибрала голландська фірма «Shell». Недоліком методу є безперервний контроль за кількістю присадки в нафті і точне його дозування, тому що при очищенні нафти фільтрами одночасно відбувається видалення присадки.

Другий шлях полягає в безпосередньому зменшенні заряду, що знаходиться в приймальному резервуарі. З цією метою використовують спеціальні пристрої, які називаються нейтралізаторами статичної електрики. Схема нейтралізатора статичної електрики наведена на рис. 10.3.

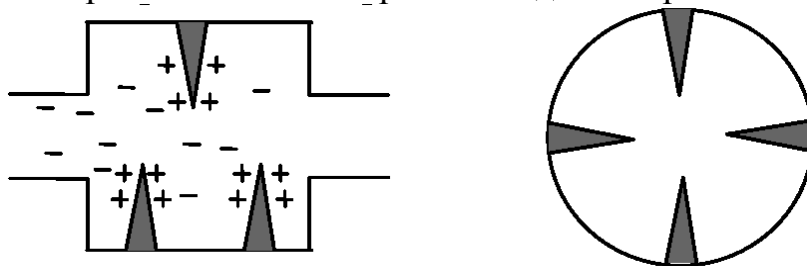


Рис. 10.3 – Нейтралізатор статичної електрики

Навколо електродів, що мають форму голок, в результаті процесів іонізації утворюються області з підвищеним вмістом іонів, що мають заряд протилежного знаку надлишкового заряду нафти (в нашому випадку позитивних іонів). В результаті рекомбінації негативних і позитивних іонів надлишковий заряд нафти зменшується.

Для вирішення завдання щодо запобігання спалаху парів нафти через розряди статичної електрики необхідно визначити величину і розподіл зарядів в приймальному резервуарі в залежності від параметрів системи транспортування, розрахувати розподілення поля і визначити можливість виникнення розрядів і займання парів в залежності від мінімальної енергії, необхідної для займання. Якщо ймовірність займання велика, то повинні використовуватися нейтралізатори або вводитися обмеження на режими перекачування (наприклад, обмеження швидкості перекачування). Небезпека виникнення розрядів статичної електрики залежить від розміру і форми використовуваних резервуарів (рис. 10.4).

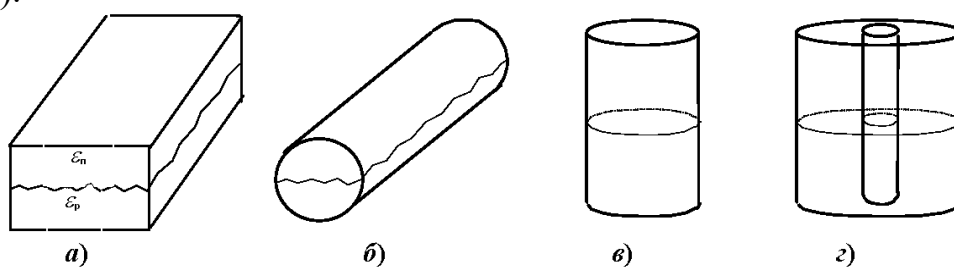


Рис. 10.4 – Види резервуарів:

а) прямокутний; б) горизонтальний циліндричний; в) вертикальний циліндричний; г) вертикальний циліндричний з центральною стійкою

10.2.3 Займання парів нафти

Заряд нафти, що надходить в резервуар, розподілений за об'ємом нерівномірно. Це пов'язано з релаксацією заряду на заземлені стінки конструкції. Тому, чим далі розглянутий об'єм нафти від стінки резервуара, тим більше заряд в об'ємі. Крім того, на поверхні нафти заряд релаксує повільніше (особливо при наближенні рівня до верхньої стінки резервуара) у зв'язку з впливом великої величини ємності між поверхнею нафти і верхньої стінкою.

Це означає, що на поверхні нафти в найбільш віддаленій точці від стінок резервуара накопичується великий заряд, який створює електричне поле між цією точкою поверхні нафти і заземленими стінками резервуара. У міру накопичення заряду зростає напруженість електричного поля аж до значення рівного величині, при якій починається розряд. У розвиненому розряді виділяється енергія, накопичена в нафті. Для того, щоб пари нафти зайнялися, необхідна певна енергія, яка рівна мінімальній енергії запалювання. Для різних речовин вона різна:

Мінімальна енергія займання паро-повітряних і кисневих (в дужках) сумішей (мДж)

Ацетилен 0,011 (0,0002)	Метан 0,29 (0,0027)
Ацетон 0,25	Пентан 0,18
Бензин Б-70 0,15-0,394	Толуол 0,60
Бензин "Калоша" 0,234-0,309	Пропан 0,25 (0,0021)
Водень 0,013	Паливо Т-1 0,202
Гексан 0,23	Сірковуглець 0,077
Гептан 0,24	Етан 0,24
Гас 0,48	Етилен 0,1
Етиловий спирт 0,14	

Енергія, що виділяється при прибої газового проміжку, визначається за формулою:

$$W = \int U i dt,$$

де відповідно U – напруга на проміжку та i – струм, що протікає через проміжок.

Мікророзряди статичної електрики не приводять до скільки-небудь помітної зміни напруги через дуже малу тривалість самих розрядів і їх малої енергії. Тоді наближено можна вважати, що $U \approx \text{const}$. Отже

$$W = U \int I dt = Uq,$$

тобто енергія пропорційна величині заряду, що протікає через канал.

На рис. 10.5 показані залежності величини зарядів, що призводять до займання парів нафтопродуктів, від діаметра заземленого кулі при позитивному і негативному зарядах статичної електрики.

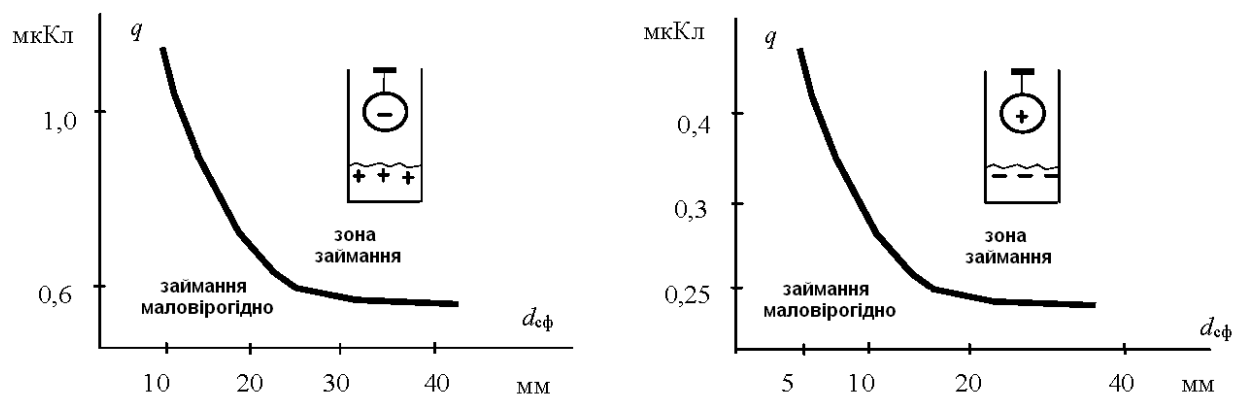


Рис. 10.5 – Займаючі властивості розрядів залежно від діаметра заземленої кулі

Запалювальну здатність розрядів статичної електрики звичайно визначають, поміщаючи заземлений сферичний електрод поблизу поверхні рідини. Видно, що запалювальна здатність розрядів різко знижується, якщо діаметр сфери стає менше 20 мм. Найменше значення заряду займання відповідає електроду діаметром 20 – 30 мм. При негативній полярності заряду нафти і нафтопродукту енергія займання нижче, ніж при позитивній. У табл. 10.1 представлені параметри груп палив по займистості.

Таблиця 10.1 Групи палив по рівню займистості

Групи палив	Температура спалаху, °С	Ймовірність утворення горючої суміші	Допустима вірогідність займання	Паливо «+»		Паливо «-»	
				q, мкКл	U _{доп} , кВ	q, мкКл	U _{доп} , кВ
I	> 50	0	1	не обмеж.	не обмеж.	не обмеж.	не обмеж.
II	35÷50	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	< 0,31	< 84	< 0,07	< 31
III	20÷35	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$8,3 \cdot 10^{-7}$	< 0,20	< 60	< 0,046	< 27
IV	18÷20	0,95	10^{-7}	< 0,16	< 54	< 0,04	< 25

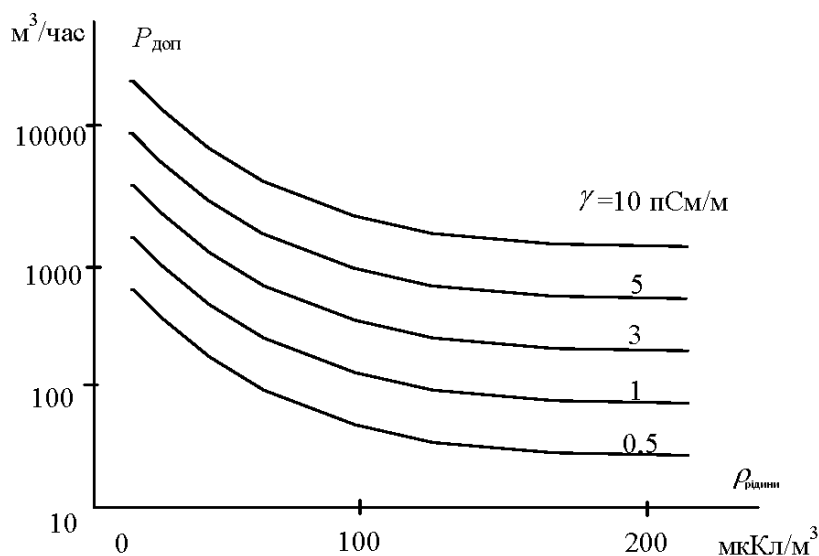


Рис. 10.6 – Залежність допустимої продуктивності перекачування нафтопродуктів від питомого заряду і провідності нафтопродуктів

Дослідження показали, що процес заповнення резервуара є безпечним, якщо потенціал на поверхні рідини не більше 25 кВ для «-» зарядженого палива і не більше 54 кВ – для «+» зарядженого палива.

Виходячи з режимів роботи перекачувальних нафтопродукти систем і умов їх безпечної роботи, визначається допустима продуктивність при накопиченні певного заряду в нафтопродуктах (рис. 10.6).

Лекція №12 Вимірювання статичної електризації та способи захисту від розрядів, спричинених її дією

10.3 Методи вимірювання основних параметрів, які характеризують статичну електризацію

Усі теоретичні міркування через безліч впливаючих невизначених факторів дають тільки якісне уявлення. Для кількісної оцінки статичної небезпеки електризації необхідні експериментальні дослідження в реальних умовах. Розроблено відповідні методики.

10.3.1 Вимірювання струмів електризації

а) Для рідких і сипучих діелектриків вимір струмів здійснюють шляхом секціонування і ізолювання окремих секцій трубопроводів і устаткування (рис. 10.7).

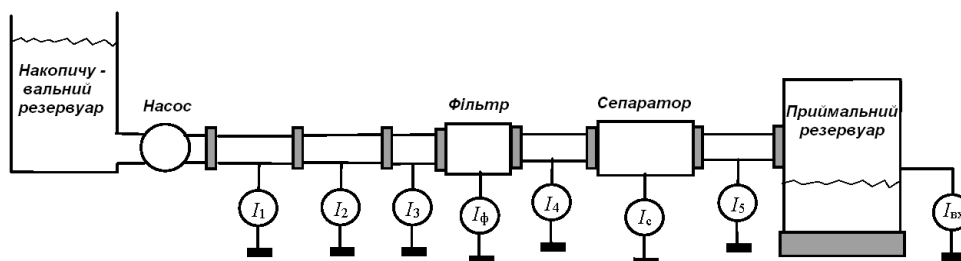


Рис. 10.7 – Вимірювання струмів електризації для рідких і сипучих матеріалів

Сумарний вхідний струм в резервуар є сумою струмів електризації:

$$I_{вх} = I_1 + I_2 + I_3 + I_{\phi} + I_4 + I_c + I_5.$$

б) При русі діелектричних ниток або стрічок вимірюється струм, що протікає в колі заземлення елементів пристроїв, при терті об які відбувається електризація матеріалів (рис.10.8).

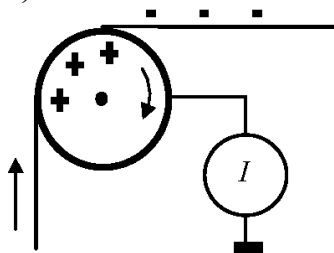


Рис. 10.8 – Електризація ниток та стрічок

Гранично густина заряду на ізолюваній стрічці може досягати величини $\sigma_{\max} = 26,5 \text{ мкКл/м}^2$, яку вдається нанести на ізолювану стрічку. Якщо густина заряду перевищує це значення, то напруженість електричного поля виявляється достатньою для виникнення електричних розрядів, які ці заряди нейтралізують. Практично вдається отримати заряд з $\sigma_{\text{практ}} = 12 \text{ мкКл/м}^2$.

10.3.2 Вимірювання параметрів зарядів і напруженості поля

1) Використання зондів.

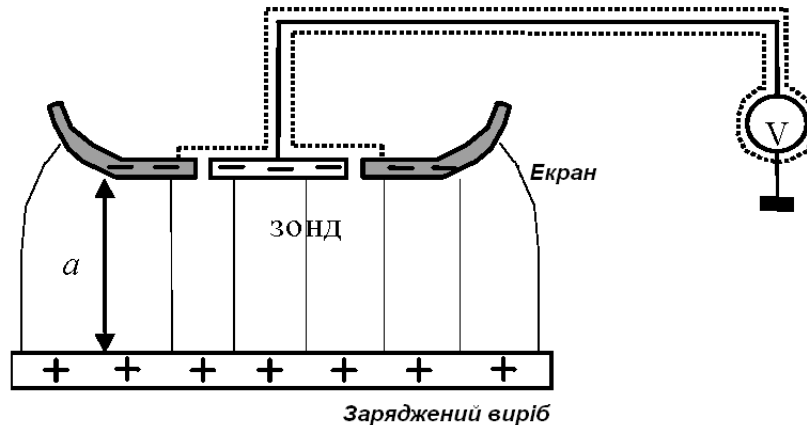


Рис. 10.9 – Вимірювання заряду за допомогою зонда

В якості зонда зазвичай використовується металевий диск невеликого розміру, що розташовується паралельно поверхні зарядженого виробу (рис. 10.9). Зонд оточений заземленим екраном, щоб виключити спотворення поля на краях зонда. Тоді можна чітко визначити частину поверхні виробу, заряд якої за рахунок електростатичної індукції наводить заряд на зонді. Вона дорівнює площі поверхні зонда.

Якщо U – потенціал зонда, який вимірюється вольтметром, то наведений на зонді заряд дорівнюватиме

$$q_{\text{нав}} = C_3 U,$$

де C_3 – ємність зонда.

Відповідно, густина заряду на виробі дорівнюватиме:

$$\sigma = \frac{q_{\text{нав}}}{S_3},$$

де S_3 – площа поверхні зонда.

За виміряної густини заряду можна визначити напруженість поля біля поверхні виробу:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}.$$

За допомогою зондів можна вимірювати напруженість електричного поля $U = Ea$, де a – відстань від датчика до наелектризованої поверхні, а також густину заряду $\sigma = \varepsilon_0 E$.

2) Використання «клітки Фарадея» (рис. 10.10).

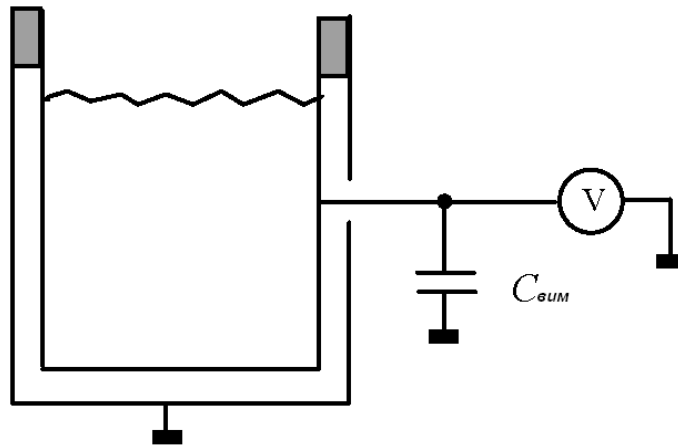


Рис. 10.10 – Вимірювання заряду за допомогою «Клітки Фарадея»

Для вимірювання заряду наелектризованої рідини або сипучого матеріалу, особливо в тих випадках, коли трубопровід або резервуар не можна ізолювати від землі, певний обсяг цієї рідини або сипучого матеріалу поміщають в ізольовану банку або посудину і вимірюють потенціал цієї посудини щодо заземленого екрану (рис. 10.10).

Заряд проби дорівнює

$$q = CU,$$

де C – ємність між посудиною і заземлювальним екраном. Густина об'ємного заряду буде дорівнювати

$$\rho = \frac{q}{V_{\text{проб}}}$$

де $V_{\text{проб}}$ – об'єм рідини або сипучого матеріалу.

3) Використання флюксметрів.

Схема флюксметра наведена на рис. 10.11. Прилад складається з нерухомого вимірювального електрода, на якому наводиться індукований зовнішнім електричним полем заряд, і обертового електрода. Обертовий електрод періодично перекриває вимірювальний електрод від дії зовнішнього поля. Коли вимірювальний електрод відкритий, на ньому наводиться заряд, коли він закритий, заряд стікає. Амплітуда струму пропорційна напруженості поля.

Струм посилюється з допомогою підсилювача і подається на реєструючий прилад. Градування флюксметра проводиться в однорідному постійному електричному полі:

$$E = \frac{U}{H},$$

де H – відстань між флюксметром і електродом, що створює зовнішнє поле.

Флюксметр використовують для вимірювання напруженості поля в танкерах, в ємностях сипучих матеріалів, поблизу поверхні плівки і т.д.

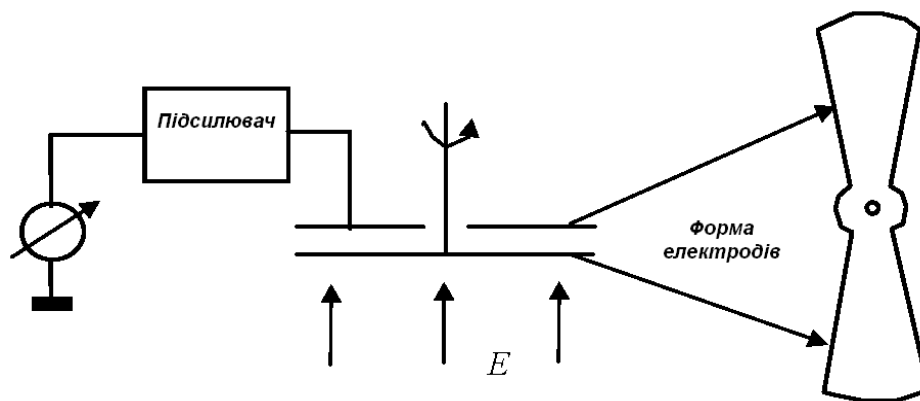


Рис. 10.11 – Вимірювання напруженості електричного поля за допомогою флюксометра

10.4 Способи захисту від розрядів статичної електрики

Способи захисту:

- Запобігання накопичення зарядів статичної електрики шляхом збільшення провідності матеріалів (присадки, вологість),
- Нейтралізація зарядів статичної електрики за допомогою спеціальних пристроїв.

1. Заземлення.

Заземлення не є захистом від зарядів статичної електрики, але воно необхідне для обмеження граничного заряду, який може накопичуватися на ізоляційних матеріалах і передаватися на провідні конструкції установок. Для статичної електрики заземленим вважається об'єкт, який має опір $R_{\text{заземл.}} < 10^7$ Ом при відносній вологості менше 60%.

Постійна часу стікання заряду з об'єкта при $t = 1$ °C повинна бути досить малою і становитиме: $\tau = 10^{-1}$ с – для невибухонебезпечних приміщень, та $\tau = 10^{-3}$ с – для вибухонебезпечних приміщень.

2. Збільшення провідності діелектричних матеріалів.

1) Використання поверхнево активних речовин – ПАР. Діелектричні речовини покривають плівкою ПАРів, що мають високу провідність. Недоліком є погіршення дії ПАРів з часом.

2) Антистатичні присадки, що додаються в діелектричні речовини і впливають на їх об'ємну провідність. Додаються в рідкі палива, можуть додаватися й у тверді матеріали. Наприклад, в поліетилен додають сажу. Недоліком є вплив присадок на структуру речовин, що погіршує їх якість.

3) Зволоження повітря. Наявність водяної пари в повітрі більше 70 % приводить до швидкого стіканню зарядів статичної електрики, завдяки появі плівки вологи на поверхні.

3. Застосування нейтралізаторів зарядів статичної електрики.

1) Індукційні (пасивні) нейтралізатори.

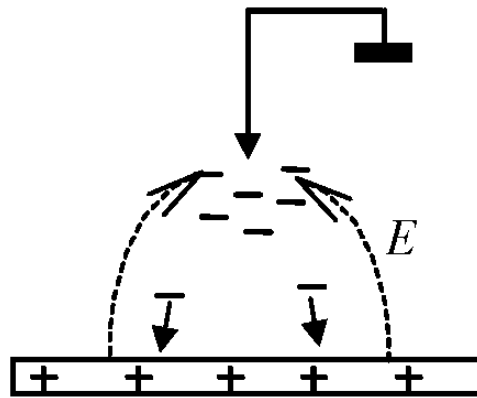


Рис. 10.12 – Схема пасивного нейтралізатора

Індукційні (пасивні) нейтралізатори (рис. 10.12.) являють собою заземлений електрод у вигляді однієї або ряду голків, розміщений над зарядженою поверхнею виробу. Електричне поле створюється між зарядженим виробом і заземленим коронуючим електродом. Іони коронного розряду під дією електричного поля рухаються до зарядженої поверхні виробу і розряджають її.

Недоліком є неможливість повного зняття заряду з виробу. Це пов'язано з необхідністю деякого «надмірного» заряду на виробі, дозволяючого отримати напруженість, яка перевищує напруженість, при якій виникає коронний розряд.

2) Високовольтні (активні) нейтралізатори.

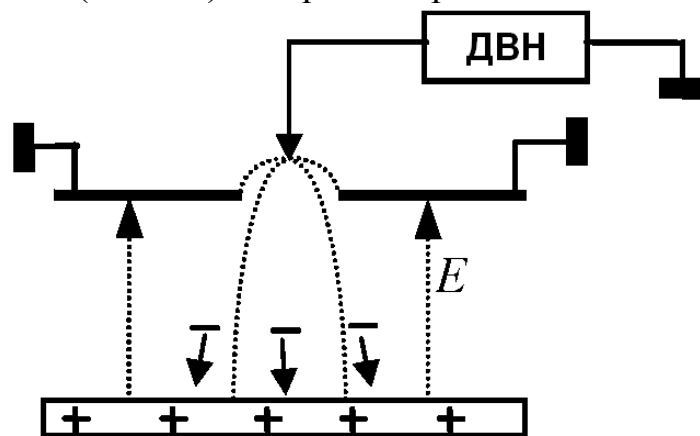


Рис. 10.13 – Схема активного нейтралізатора

В нейтралізаторах даного типу на коронуючий високовольтний електрод подають потенціал від джерела високої напруги (рис. 10.13.).

У цьому зв'язку нейтралізатори отримали назву – активні. Наявність високовольтного джерела забезпечує стійку генерацію іонів незалежно від наявності зарядів на виробі. Коронний розряд може створюватися між голчастим електродом і не коронуючим заземленим електродом, виконаним у вигляді кільця, в отворі якого розміщується коронуючий електрод. Якщо необхідно знімати заряди певного знаку, то застосовують джерела постійної напруги. Для зняття будь-яких знаків заряду на виробі використовують джерела змінної напруги. Надходження іонів до поверхні виробу забезпечується за рахунок поля зарядів статичної електрики.

3) Радіоактивні нейтралізатори.

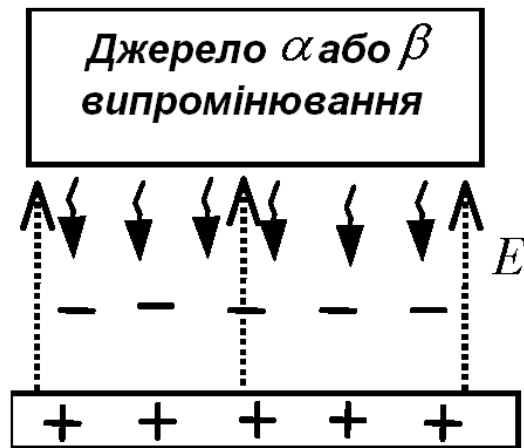


Рис. 10.14 – Схема радіоактивного нейтралізатора

Іонізація молекул повітря з утворенням «+» і «-» іонів відбувається за рахунок енергії радіоактивного α або β випромінювання (рис. 10.14.). В залежності від знаку заряду на виробі під дією електричного поля, створюваного цим зарядом, до поверхні виробу рухаються іони протилежного знаку. Недоліком радіоактивних нейтралізаторів є малий іонізаційний струм порівняно з іншими нейтралізаторами.

4) Комбіновані нейтралізатори – представляють собою комбінацію радіоактивних і пасивних нейтралізаторів.

5) Аеродинамічні нейтралізатори.

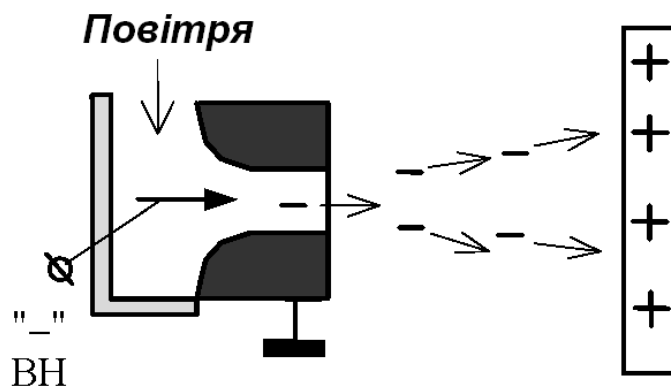


Рис. 10.15 – Схема аеродинамічного нейтралізатора

Іони, утворені в полі коронного розряду, створюваного в камері, виносяться в область виробу потоком повітря (рис. 10.15). Даний тип нейтралізаторів знаходить застосування в тих випадках, коли неприпустимий вплив на виріб світловим випромінюванням коронного розряду або потоком радіоактивного випромінювання, наприклад, нейтралізація зарядів при виробництві фотоплівки і фотопапєрів.

Ефективність нейтралізаторів η може бути записана в наступному вигляді

$$\eta = \left(1 - \frac{\sigma_{\text{зал}}}{\sigma_{\text{поч}}} \right) \cdot 100\%,$$

де $\sigma_{\text{поч}}$ і $\sigma_{\text{зал}}$ – початкова та залишкова густина зарядів статичної електрики.

Нейтралізатор, який повністю усуває електризацію ($\sigma=0$), володіє ефективністю $\eta=100\%$. Якщо відбувається часткова нейтралізація заряду ($\sigma_{\text{зал}}/\sigma_{\text{поч}}>0$) або перезарядження ($\sigma_{\text{зал}}/\sigma_{\text{поч}}<0$), то $\eta < 100\%$.

У динамічному режимі, коли відбувається безперервна генерація зарядів статичної електрики на поверхні наелектризованого матеріалу $\sigma_{\text{поч}}$, еквівалентна густина струму на одиницю довжини, створена зарядами статичної електрики при їх переміщенні зі швидкістю V дорівнює

$$J_{\text{поч}} = \sigma_{\text{поч}} V.$$

Тоді ефективність роботи нейтралізатора визначається за виразом:

$$\eta = \frac{J_{\text{нейтр}}}{J_{\text{поч}}},$$

де $J_{\text{нейтр}}$ – густина струму нейтралізатора на одиницю довжини, визначена з вольт-амперної характеристики. Вольт-амперні характеристики нейтралізаторів різних типів наведені на рис. 10.16.

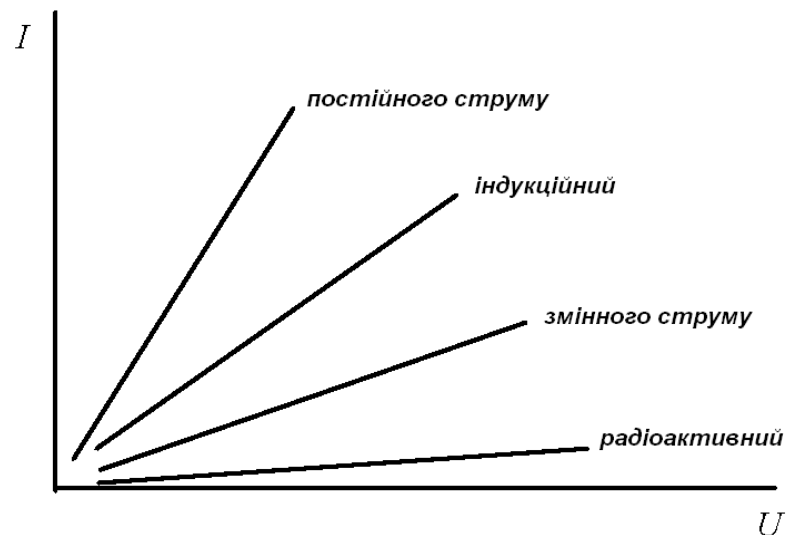


Рис. 10.16 – Вольт-амперні характеристики нейтралізаторів статичної електрики

З характеристик випливає, що найбільш ефективними є нейтралізатори постійного струму, а потім індукційний і змінного струму, і нарешті, радіоактивні.

ТЕМА 11 ЗНЕВОДНЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ

Лекція №13 Елетротехнологічні процеси зневоднення нафтопродуктів

11.1 Вимоги до вмісту води і солей в нафтопродуктах

Якість видобутої нафти і якість нафтопродуктів поряд з іншими показниками визначається вмістом в них вологи. Вміст вологи у вихідному продукті коливається в широких межах – від 60 % до 0,1 %. Волога може перебувати в нафтопродуктах у вигляді крапельок води, що знаходяться в підвішеному стані і утворюють емульсії, або в розчиненому вигляді.

Крім того, якість сирової нафти визначається вмістом солей, що може досягати декількох грамів на літр.

Наявність у нафті води і солей викликає цілий ряд труднощів у процесі транспортування та переробки:

1. Задоволення вимог щодо якості поставляємої сирової нафти і нафтопродуктів.
2. Підвищена корозія трубопроводів та елементів технологічного обладнання.
3. Додаткові енерговитрати на перекачування і ректифікацію.
4. Забруднення елементів технологічного устаткування.

На практиці необхідність зневоднення та знесолення виникає тричі в ланцюзі: видобуток – транспортування – переробка.

Вимоги до якості нафти і нафтопродукту перед транспортуванням такі:

- Вміст вологи $W_{\text{води}} < 0,5 \%$;
- Вміст солей $P_{\text{солі}} < 200 \text{ мг/л.}$

Перед ректифікаційної колоною повинні задовольнятися вимоги:

- $W_{\text{води}} < 0,05 \%$;
- $P_{\text{солі}} < 20 \text{ мг/л.}$

До кінцевого продукту пред'являються більш суворі вимоги, тому часто доводиться використовувати навіть додаткову перегонку.

Крім первинної води, присутньої в сирій нафті, часто доводиться додатково додавати деяку кількість чистої води для розчинення присутніх в нафті солей, і тоді система зневоднення стає двох-, триступеневою.

11.2 Теоретичні основи зневоднення нафтопродуктів

Електронно-іонні технології застосовуються при зневодненні сирової нафти і нафтопродуктів. Вода в нафту потрапляє при видобутку нафти з нафтових свердловин, а також в ході технологічних процесів переробки нафти в нафтопродукти. Для забезпечення високої якості нафтопродуктів необхідно в ході технологічного процесу зневоднення вивести в максимально доступній кількості солі і воду з нафтопродукту.

Видалення води з нафтопродукту може відбуватися в результаті організації спрямованого руху крапель води з об'єму нафтопродукту.

Першим напрямком є використання седиментації крапель води. Іншими словами, в процесі відстою краплі води під дією сили тяжіння осідають на дно резервуара.

Другий напрямок – зарядження і організація руху частинок води в електричному полі таким чином, щоб краплі води були видалені за межі об'єму нафтопродукту.

Крапельки води можуть під дією сил електричного поля збиратися на електродах або спеціальних пористих перегородках і стікати на дно посудин. Видалення води з дна резервуара проводиться шляхом зливу.

Видалення води з нафти ґрунтується на тому, що вода має більшу густину, ніж нафта, і в процесі відстою краплі води падають на дно резервуара. Нафта спливає і залишається у верхній частині резервуара. Ефективність процесу видалення води з об'єму нафтопродукту залежить від в'язкості нафтопродукту.

В'язкість визначається температурою, і, чим вище температура, тим менше в'язкість і більше швидкість седиментації. Також швидкість процесу залежить в значній мірі від розміру крапель води: чим більше радіус краплі, тим вище швидкість осідання крапель.

11.2.1 Седиментація крапель води в нафтопродукті

Встановлена швидкість осідання крапель води в нафтопродукті визначається з умови рівності зовнішньої сили F , що діє на краплю, силі опору середовища руху краплі. Зовнішня сила, що діє на краплю, яка знаходиться в нафтопродукті, дорівнює різниці між силою тяжіння і Архімедовою силою (силою плавучості)

$$F_{\text{зс}} = \frac{4}{3} \pi a^3 g \Delta \rho, \quad (11.1)$$

де a – радіус краплі, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, $\Delta \rho$ – різниця значень густини води та нафтопродукту ($\Delta \rho = \rho_{\text{в}} - \rho_{\text{н}}$).

В силу великої в'язкості нафтопродукту і малих розмірів крапель води їх осадження відбувається в межах стоксовського діапазону числа Рейнольдса ($Re \leq 0,5$) і сила опору середовища визначається за формулою Стокса:

$$F_{\text{с}} = 6\pi \mu_{\text{еф}} a V_{\text{с}}, \quad (11.2)$$

де $V_{\text{с}}$ – швидкість седиментації (осадження); $\mu_{\text{еф}}$ – ефективна в'язкість середовища.

Ефективна в'язкість у формулі (11.2) відрізняється від в'язкості середовища (нафтопродукту) через те, що рух краплі щодо нафтопродукту викликає циркуляцію води в краплі і це призводить до деякого зменшення опору середовища в порівнянні з рухом твердої сферичної частинки. Тоді

$$\mu_{\text{еф}} = \mu \frac{2\mu + 3\mu_{\text{в}}}{3(\mu + \mu_{\text{в}})}, \quad (11.3)$$

де $\mu = (1 \div 10) \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – в'язкість нафтопродукту в залежності від його сорту; $\mu_{\text{в}} = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – в'язкість води.

Прирівнюючи (11.1) і (11.2), отримаємо вираз для швидкості седиментації

$$V_{\text{с}} = \frac{2ga^2\Delta\rho}{9\mu_{\text{еф}}}. \quad (11.4)$$

При $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ і $\rho_{\text{нафти}} = 850 \text{ кг/м}^3$ отримаємо швидкість седиментації рівній $V_{\text{с}} \sim 5 \cdot 10^4 \text{ а}^2$. Таким чином, швидкість осадження крапель в нафтопродуктах росте пропорційно квадрату радіусу крапель.

11.2.2 Рух заряджених крапель в електричному полі в нафтопродукті

Швидкість руху крапель в електричному полі в нафтопродукті визначається з рівності сили, діючої в електричному полі на краплю, і сили опору середовища руху краплі.

Припустимо, що в нафтопродукті присутні іони одного знаку. Тоді в електричному полі крапля набуває, як було показано раніше, найбільший можливий заряд рівний

$$q_{\text{к}} = 12\pi\epsilon_0 a^2 E. \quad (11.4)$$

Відповідно, сила, що діє на краплю в електричному полі, дорівнюватиме

$$F_{\text{е}} = q_{\text{к}} E = 12\pi\epsilon_0 a^2 E^2. \quad (11.5)$$

Прирівнюючи (11.5) силі опору середовища по (11.2) отримаємо формулу для швидкості руху крапель в електричному полі:

$$V_{\text{Е}} = \frac{2\epsilon_0 a E^2}{\mu_{\text{сф}}}. \quad (11.6)$$

Зіставимо швидкість руху крапель під дією електричного поля і в результаті седиментації. Відношення значень швидкості по (11.6) і (11.4) записується у вигляді:

$$\frac{V_{\text{Е}}}{V_{\text{с}}} = \frac{9\epsilon_0 E^2}{g a \Delta \rho}. \quad (11.7)$$

У табл. 11.1 представлені значення швидкості седиментації $V_{\text{с}}$, часу осадження крапель на відстань 1 м $t_{\text{вст}} (L = 1 \text{ м})$ в годинах і відношення $V_{\text{Е}}/V_{\text{с}}$ по (11.7) для наступних умов $E = 3 \text{ кВ/см}$, $\Delta \rho = 150 \text{ кг/м}^3$ в залежності від розміру крапель.

Таблиця 11.1

a , (мкм)	5	10	100	500	1000
$V_{\text{с}}$, (м/с)	$1,25 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
$t_{\text{вст}} (L=1 \text{ м})$, (год)	220	55	0,55	0,022	$5,5 \cdot 10^{-3}$
$V_{\text{Е}}/V_{\text{с}}$	1100	550	55	11	5,5

З табл. 11.1 випливає, що час відстою для частинок радіусом менше 100 мкм істотно перевищує 1 год., що представляється гранично доцільним. Для частинок менше 100 мкм рух в електричному полі може розглядатися як більш кращий механізм видалення крапель вологи з об'єму нафтопродукту. Навіть для великих крапель рух в електричному полі залишається досить ефективним.

11.2.3 Процеси укрупнення крапель води

Процеси укрупнення крапель води в нафтопродукті відіграють дуже важливу роль, так як призводять до суттєвого зростання швидкості седиментації. Процес злиття крапель води, або коалесценції, може відбуватися

в результаті зіткнення частинок різного розміру при седиментації, при взаємодії поляризованих частинок в електричному полі або при зіткненні частинок, що беруть участь в турбулізованому русі середовища.

Число зіткнень при седиментації зростає при збільшенні відносної швидкості зближення частинок. Як впливає з (11.4)

$$V_{\text{відн}} \equiv a_1^2 - a_2^2,$$

де a_1 і a_2 – відповідно радіуси взаємодіючих частинок.

Таким чином ясно, що ефективність коалесценції зростає із збільшенням радіусу частинок при одночасному збільшенні відмінності в їх розмірі.

На процес злиття крапель води при зіткненні впливає шар нафтопродукту, який перешкоджає цьому злиттю.

Руйнування тонкого шару нафтопродукту на поверхні краплі забезпечується впливом хімічних речовин – деемульгаторами. Дія деемульгатора приводить до зниження сил поверхневого натягу і, таким чином, полегшує їх злиття.

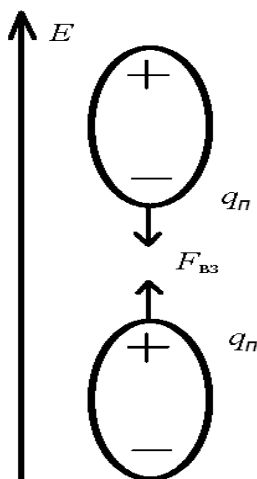


Рис. 11.1 – Поляризація взаємодіючих крапель в електричному полі

Основним недоліком процесу видалення вологи за рахунок седиментації є:

1. Велика тривалість процесу седиментації.
2. Необхідність розміщення великих обсягів нафти в спеціальних відстійниках.

Плівка на поверхні крапель активно руйнується при взаємодії крапель у електричному полі. Процес злиття крапель відбувається наступним чином.

Краплі, потрапляючи в електричне поле, поляризуються, і їх форма наближається до еліпсоїдальної (рис. 11.1). Зіткнення і злиття крапель відбувається за рахунок кулонівської взаємодії протилежних за знаком поляризаційних зарядів частинок, що опинилися поблизу одна від одної. З електростатики відомо, що заряд поляризації $Q_{\text{п}} \equiv E a^2$. Отже, сила взаємодії, що визначає зближення і злиття крапель $F_{\text{вз}} = q_{\text{п}} E \equiv a^2 E^2$.

Таким чином, ефективність коалесценції крапель в електричному полі істотно зростає із збільшенням розміру частинок і напруженості поля.

Однак деформація крапель в електричному полі може привести до процесу зворотного по відношенню до коалесценції – розриву крапель. Це відбувається,

коли дія поля на поляризаційні заряди перевищує дію сил поверхневого натягу, що перешкоджають розриву крапель.

Таким чином, якщо $F_{розр} \equiv a^2 E^2$ і $F_{пов} \equiv \sigma a$, де σ – коефіцієнт поверхневого натягу на межі розділу середовищ вода-нафта ($\sigma \approx 20 \cdot 10^{-3}$ Н/м), то з умови $F_{розр} = F_{пов}$ випливає, що

$$E_{кр} \equiv \sqrt{\frac{\sigma}{a}} \quad \text{або} \quad a_{кр} \equiv E_{кр}^{-2}. \quad (11.8)$$

На рис. 11.2 показана залежність критичної напруженості електричного поля від розміру крапель. В області, що знаходиться нижче цієї кривої, переважає коалесценція крапель води. Область, що лежить вище кривої, відповідає розриву крапель води під дією сил поляризації.

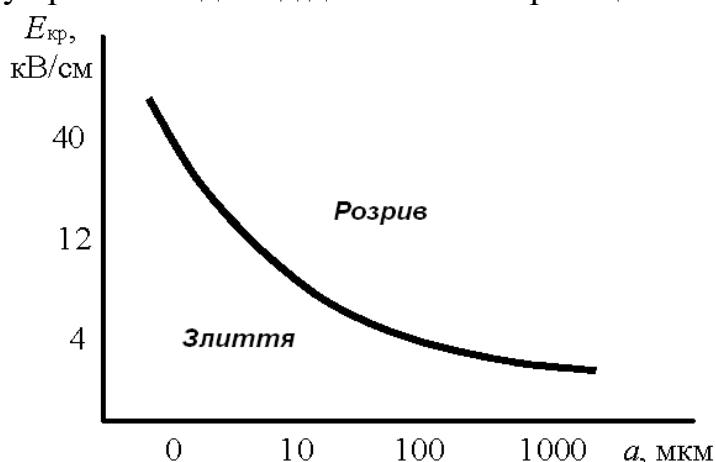


Рис. 11.2. – Залежність критичної напруженості поля від радіусу краплі

11.2.4 Зарядження крапель води в нафтопродукті

Процес видалення крапель з нафтопродукту під дією електричного поля визначається величиною заряду крапель. Для судження про можливий механізм зарядження крапель води в нафтопродукті розглянемо іонний склад нафтопродуктів.

Вода і нафтопродукти характеризуються такими значеннями діелектричної проникності ϵ , питомої провідності γ і коефіцієнта динамічної в'язкості μ :

1. Вода $\epsilon \approx 80$ $\gamma \approx 10^{-2} \div 10^{-4}$ 1/Ом·м $\mu = 10^{-3}$ кг/м·с;
2. Сира нафта $\epsilon \approx 4 \div 5$ $\gamma \approx 10^{-6} \div 10^{-9}$ 1/Ом·м $\mu = (1 \div 10) 10^{-2}$ кг/м·с;
3. Світлі нафтопродукти $\epsilon \approx 2,2$ $\gamma \approx 10^{-10} \div 10^{-12}$ 1/Ом·м $\mu = (1 \div 10) 10^{-2}$ кг/м·с.

Під впливом сильних електричних полів в діелектричних рідинах – нафті і нафтопродуктах – починається процес дисоціації – утворення позитивних і негативних іонів.

Електричне поле змушує рухатися різнойменно заряджені іони в об'ємі рідини. В результаті біля електродів створюються області з надлишковим вмістом іонів одного знаку. З ростом концентрації іонів в об'ємі збільшується ймовірність зіткнень різнойменно заряджених частинок, що супроводжуються

рекомбінацією. Встановлюється динамічна рівновага між утвореними і рекомбінуючими іонами.

Рух іонів в нафті, яка має набагато більшу в'язкість, ніж вода, викликає рух рідини і утворення в її об'ємі електрогідродинамічних потоків. Це відбувається тому, що рух іонів у в'язкій рідині передається нейтральним частинкам, а це, в свою чергу, призводить до інтенсивного перемішування рідини, збільшуючи інтенсивність взаємодії крапель.

Краплі в нафтопродукті можуть набувати заряд за контактним механізмом або в результаті осадження іонів в електричному полі в об'ємі нафтопродукту.

Крапля води при контакті з електродами в електричному полі набуває заряд, що співпадає по знаку з полярністю електрода. Як тільки крапля відірветься від електрода, заряд з неї починає стікати завдяки провідності нафти.

Постійна часу стікання заряду $\tau = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\gamma}$. Для нафти найбільша величина τ дорівнює $\tau = \frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{10^{-9}} = 1,7 \cdot 10^{-2}$ с.

З наведеної оцінки видно, що крапля води в нафті швидко втрачає свій заряд і в цьому випадку індукційне зарядження неефективне.

Для світлих нафтопродуктів оцінка часу релаксації дає значення $\tau = 2$ с. Тут індукційне зарядження стає ефективним, так як крапля не встигає втратити заряд.

У відповідності з теорією індукційного зарядження частинок, викладеної раніше, сферична частинка на електроді моделюється півеліпсоїдом обертання із співвідношенням осей $b/a = c/a = 0,5$ (a – довжина півосі в напрямку перпендикулярному електроду і b – радіус сфероподібної частинки), і величина заряду такої моделі дорівнює:

$$q = -5,82\pi\varepsilon_0 E_{\text{зн}}^2. \quad (11.9)$$

Крім того, відома більш точна формула, яка відноситься безпосередньо до сфери радіуса b

$$q = -\frac{2\pi^3}{3} \varepsilon_0 E_{\text{зн}}^2. \quad (11.10)$$

Різниця між значеннями заряду по (11.9) і (11.10) становить 12 %.

Розглянемо зарядження крапель води в об'ємі нафтопродукту в електричному полі. У загальному випадку в об'ємі нафтопродукту знаходяться і позитивні і негативні іони. За рахунок їх осадження на краплі води відбувається зарядження.

У відповідності з теорією іонного зарядження (п. 5.2.1) граничний заряд краплі води дорівнює

$$q_{\text{гран}} = q_m \frac{1 - \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}{1 + \sqrt{\frac{en_- k_-}{en_+ k_+}}}, \quad (11.11)$$

де $q_m = 12\pi\epsilon_0 a^2 E$, a – радіус краплі, $\gamma_{v+} = en_+ k_+ = \rho_+ k_+$, $\gamma_{v-} = en_- k_- = \rho_- k_-$ – питомі провідності, зумовлені відповідно позитивними і негативними іонами. Результируюча провідність $\gamma_v = \gamma_{v+} + \gamma_{v-}$.

Рухливості позитивних і негативних іонів приблизно рівні, тобто $k_+ = k_-$. Крім того, уявімо густину об'ємного заряду іонів в наступному вигляді $\rho_+ = \rho_{cp}$ і $\rho_- = \rho_{cp} + \Delta\rho$, де ρ_{cp} – частина густини об'ємного заряду однакова для позитивних і негативних іонів; $\Delta\rho$ – перевищення густини заряду одного з видів іонів, в даному випадку, негативних іонів.

Тоді (11.11) перепишеться у вигляді:

$$q = q_m \frac{1 - \sqrt{1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}}}}. \quad (11.12)$$

Якщо $\frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} \ll 1$, то (11.12) спрощується:

$$|q| = q_m \frac{\Delta\rho}{4\rho_{cp}}. \quad (11.13)$$

Врахуємо збільшення провідності середовища за рахунок дисоціації в електричному полі, тобто

$$\rho_{cp} = \frac{\gamma_v}{2k} = \frac{\gamma_{v0} k_{зб}(E)}{2k}, \quad (11.14)$$

де γ_{v0} – провідність середовища при відсутності поля, $k_{зб}(E)$ – коефіцієнт збільшення провідності за рахунок дисоціації.

Скористаємося далі моделлю одновимірного шару об'ємного заряду густиною $\Delta\rho$ і товщиною h , щоб записати вираз для напруженості цього шару

$$E_{ш} = \frac{\Delta\rho \cdot h}{2\epsilon_0 \epsilon}. \quad (11.15)$$

Якщо напруженість поля, що створюється надлишковим зарядом, порівнянна з середнім полем в установці, тобто $E_{сер} = E_{ш}$ то з (11.14) і (11.15) одержимо:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_{cp}} = \frac{4\epsilon_0 \epsilon E_{сер} k}{h \gamma_{v0} k_{зб}(E)}. \quad (11.16)$$

У табл. 11.2 представлені значення заряду по відношенню до максимально можливого (граничного) q/q_m в залежності від провідності середовища при наступних умовах $h = 0,05$ м, $E_{сер} = 5 \cdot 10^5$ В/м, $k_{зб}(E) = 2,5$.

Таблиця 11.2

$\gamma_{v0}, 1/\text{Ом}\cdot\text{м}$	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}
$\Delta\rho/\rho_{сер}$	30	3	0,3	0,03
q/q_m	0,7	0,33	0,07	0,007

З представлених в таблиці 11.2 даних випливає, що на краплях води в нафті не може накопичуватися який-небудь значний заряд. Об'ємне зарядження крапель води ефективне для світлих нафтопродуктів з високим питомим

опором. Для нафти можна рекомендувати коалесценцію в електричному полі за участю механізму поляризації.

Лекція № 14 Промислові електротехнологічні установки для знесолення і зневоднення нафтопродуктів

11.3 Конструкції промислових технологічних установок для знесолення і зневоднення нафти і нафтопродуктів

Розглянуті вище способи виведення води з нафти і нафтопродуктів реалізовані в конструкціях технологічних апаратів знесолення і зневоднення. Розглянемо схему процесу знесолення і зневоднення сирової нафти на нафтоперегінному заводі (НПЗ), показану на рис. 11.3.

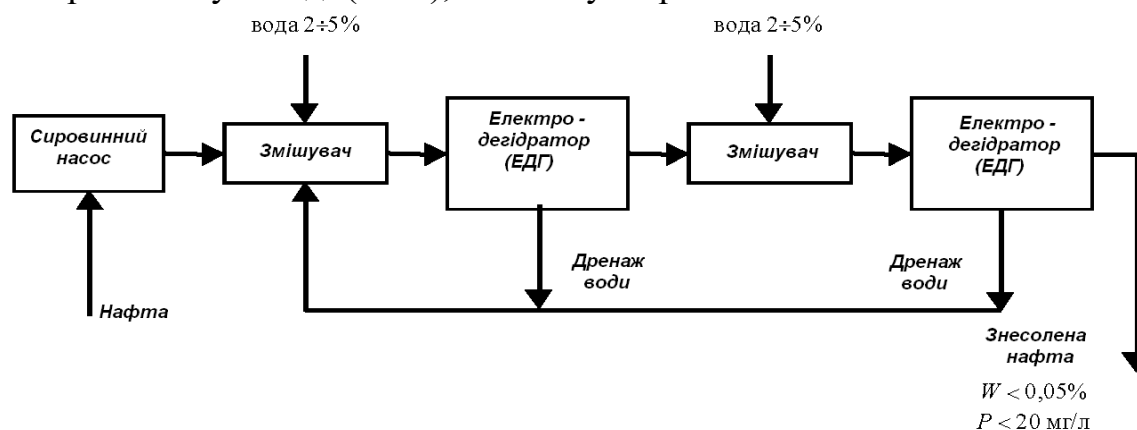


Рис. 11.3 – Схема зневоднення та знесолення на НПЗ

Сировинний насос подає нафту в змішувач, де відбувається активне вихрове змішування нафти з прісною водою, що додається в кількості 2÷5 % по відношенню до нафти. Прісна вода активно розчиняє солі, виводячи її з нафти. Водно-нафтова емульсія надходить потім у електродегідратор – апарат для зневоднення нафти. В цьому апараті відбувається виділення води з суміші та отримання знесоленої нафти. Потім ці операції повторюються у другому ступені технологічного процесу. У результаті на виході установки виходить знесолена нафта з вмістом води $W < 0,05\%$ і солей $P < 20$ мг/л.

Конструкції електродегідраторів показані на рис. 11.4. Електродегідратори являють собою резервуари з розміщеними всередині системами електродів. Розрізняються два типи конструктивних рішень резервуарів, що мають різні технологічні параметри:

- | | |
|--|---|
| 1. ЕДГ кульової конструкції | $V = 600 \text{ м}^3, P = 6\div 7 \text{ атм};$ |
| 2. ЕДГ циліндричний вертикального типу | $V = 30 \text{ м}^3, P = 16 \text{ атм};$ |
| 3. ЕДГ циліндричний горизонтального типу | $V = 160 \text{ м}^3, P = 16 \text{ атм}.$ |

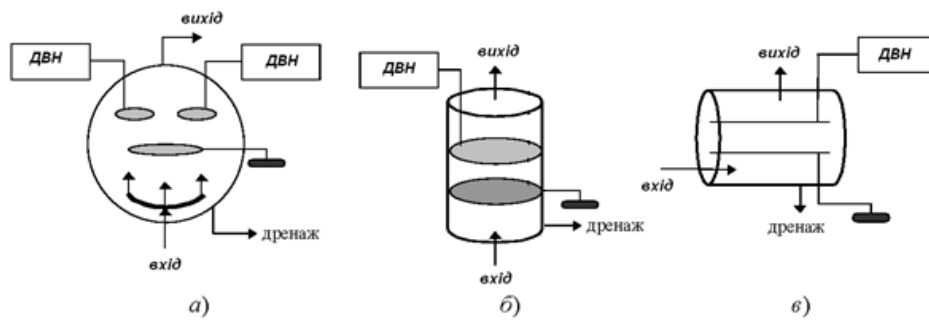


Рис. 11.4 – Конструкції електродегідраторів:

а) кульової конструкції; б) вертикального типу; в) горизонтального типу

Робота електродегідраторів відбувається наступним чином. Робоча зона створюється між заземленим електродом і електродом, на який подається висока напруга. У цій зоні краплі води набувають заряди і, стикаючись між собою, зливаються і збільшуються в розмірах. Великі краплі випадають на дно, утворюючи шар води, який видаляється по відповідних трубах. Продукт для очищення – нафтова емульсія – подається по трубах, які перебувають близько до дна апарату. Таким чином, шар нафти для очищення від води рухається вгору, потрапляє в активну зону, очищається там від води, і очищена нафта накопичується у верхній частині резервуара. Звідси вона видаляється для подальшої обробки.

На практиці застосовується три типи резервуарів. Кульовий резервуар має значний недолік, що складається в тому, що у нього є зони, в яких відсутнє електричне поле. Ці зони знижують продуктивність апарату зневоднення нафти.

Також використовуються циліндричні резервуари вертикального і горизонтального типу, в яких немає практично зон без електричного поля. Горизонтальні апарати мають більший об'єм і велику продуктивність, так як завдяки більшому горизонтальному перетину апарат має велику робочу площу електродів, в цьому апараті встановлюється менша вертикальна швидкість нафти в зоні дії електричного поля.

Електродна система являє собою набір металевих прутків діаметром 2,5 мм при відстані між ними 20 см. Прутки збираються у вигляді двох плоских рам, розташованих у двох паралельних площинах з відстанню між площинами 15 ÷ 20 см. Прутки в кожній рамі розташовані паралельно один одному, на сусідніх рамах – компланарно (рис. 11.5).

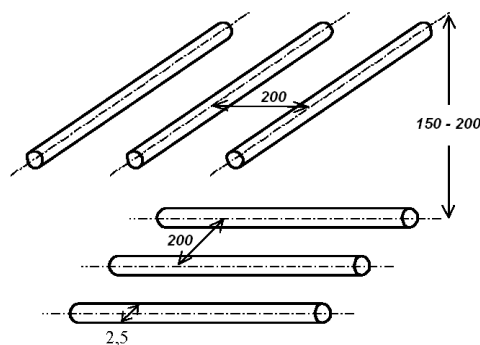


Рис. 11.5 – Електродна система електродегідраторів

11.4 Технології зневоднення нафтопродуктів

Як було показано в попередніх розділах методи розділення водо-нафтових емульсій залежать від концентрації диспергованої в нафті води. В залежності від вмісту води розрізняють: глибоке зневоднення, надглибоке зневоднення і зневоднення високообводнених нафт.

11.4.1 Глибоке зневоднення нафтопродуктів

При вмісті води $W > 0,1$ % відстань між краплями порівнянні з їх розмірами ($a \approx 1 \div 100$ мкм), а при вмісті води $W < 0,05$ % відстань між краплями більше і більше питомий опір емульсії.

Під глибоким зневодненням розуміється зміна концентрації води від початкового значення з $W_{\text{води}} \geq 0,1$ % до кінцевого з $W_{\text{води}} \leq 0,05$ %. Це відповідає діапазону концентрацій емульгованої води в сирій нафті. Тому прийнятний тільки спосіб коалесценції в електричному полі.

Як було показано раніше, чим вище напруженість електричного поля, тим ефективніше процес коалесценції. Проте для дуже великих крапель в сильних полях з'являється зворотний ефект, при якому крапля поляризується, розтягується вздовж ліній поля і розривається. Залежність критичної напруженості поля, при якій можливий процес її розриву, від розміру краплі представлена на рис. 11.2. Для укрупнення крапель вище критичного розміру при робочій напруженості поля застосовують спеціальне ступеневе живлення установки (рис. 11.6).

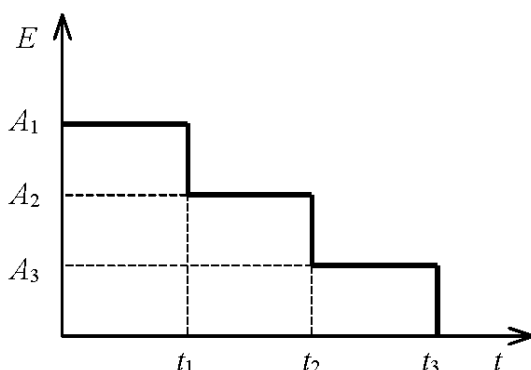


Рис. 11.6 – Ступеневе електроживлення установки зневоднення нафти

На інтервалі часу від 0 до t_1 відбувається укрупнення крапель до $a_{\text{кр}1}$, потім напруженість поля знижується і на інтервалі часу від t_1 до t_2 крапля ще укрупнюється до $a_{\text{кр}2}$ і так далі, поки не буде досягнутий розмір крапель, необхідний для швидкої седиментації.

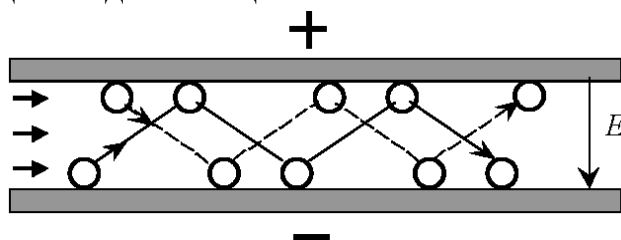


Рис. 11.7 – Механізм злиття різноіменно заряджених крапель

В дійсності, додатково до описаного механізму працює ще механізм злиття різнойменно заряджених крапель при їх русі в проміжку (рис. 11.7).

Краплі, досягаючи поверхні електрода, заряджаються по індукційному механізму і, відриваючись від поверхні електрода, рухаються вглиб проміжку. Якщо відстані між електродами невеликі, то краплі не встигають повністю втратити свій заряд за рахунок витоку. Злиття різнойменно заряджених частинок відбувається в разі їх зіткнення.

11.4.2 Надглибоке зневоднення

Під надглибоким зневодненням розуміється зміна концентрації води від початкового значення з $W \leq 0,05 \%$ до кінцевого з $W = 0$. Це відповідає діапазону концентрацій емульгованої води в світлих нафтопродуктах (бензин, гас, трансформаторне масло).

Використовувана традиційно механічна очистка за допомогою фільтрів має цілий ряд недоліків:

1. необхідна регулярна регенерація або періодична заміна фільтрів;
2. проходячи через фільтр паливо додатково електризується.

Принципова схема установки для надглибокого зневоднення світлих нафтопродуктів представлена на рис. 11.8.

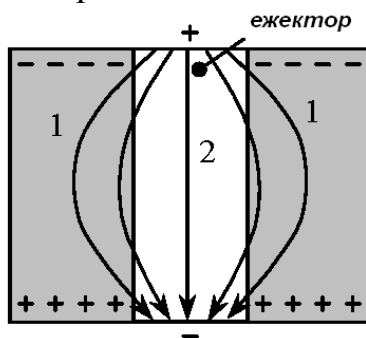


Рис. 11.8 – Принципова схема установки для надглибокого зневоднення нафтопродуктів, де 1 – пористий діелектрик; 2 – вільний простір

Робочий простір апарату частково заповнений пористим діелектриком, який має сильно розвинену поверхню і перешкоджає інтенсивному перемішуванню емульсії в процесі роботи. Нафтопродукт надходить у вільний простір апарату через тонку вхідну щілину, де відбувається контактне зарядження крапель води.

Таким чином, емульсія надходить в камеру апарату вже заряджена. У вільному об'ємі камери відбувається інтенсивне перемішування емульсії за рахунок виникаючих під дією електричного поля електрогідродинамічних потоків. Заряджені крапельки води, рухаючись по силових лініях поля, потрапляють на поверхню діелектрика і прилипають до неї. Нові краплі, що прийшли з потоком, зливаються з першими. На поверхні діелектрика йде процес укрупнення прилиплених крапель. Як тільки крапля виростає до великих розмірів, вона відривається і стікає в нижню частину камери.

Основними перевагами цієї технології є:

1. Відсутність динамічного опору потоку нафтопродуктів у вільному просторі камери;

2. Простота управління технологічним процесом, тому що інтенсивність процесу залежить від значення прикладеної напруги і від в'язкості нафтопродукту.

В даний час створені установки для зневоднення гасу при заправці літаків з продуктивністю до 2 т/хв.

11.4.3 Зневоднення високообводнених нафт і аномально стійких емульсій

Існують нафти, в яких вода становить до 60 %. Такі нафти являють собою краплі води, вкриті нафтовою оболонкою, що не дає цим краплям зливатися.

Процес укрупнення краплі води може бути здійснено шляхом хімічних добавок, що руйнують нафтову оболонку крапель і дозволяють краплям зливатися.

Другим способом, який є кращим, є організація коалесценції крапель води в електричному полі. Необхідно забезпечити, щоб при цьому не виникало короткого замикання між електродами, яке можливе через високу провідність нафти і наявність великої кількості крапель. Існує кілька способів усунення короткого замикання:

1. На електродах створити діелектричне покриття;
2. Забезпечити газовий зазор біля електрода;
3. Створити вихровий рух рідини, що перешкоджає утворенню ланцюжків з крапель;
4. Використовувати певні джерела високої напруги, які запобігають виникненню коротких замикань.

Використання діелектричного покриття.

Цей спосіб реалізується шляхом нанесення діелектричного покриття на високовольтний електрод (рис. 11.9).

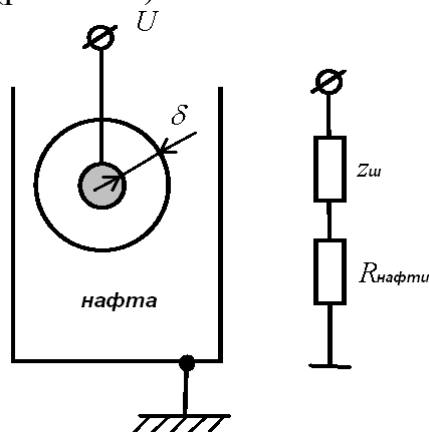


Рис. 11.9 – Апарат зневоднення високообводнених нафт і еквівалентна схема

При виникненні провідних каналів в нафті напруга прикладається до діелектричного шару і короткого замикання не відбувається. У нормальному режимі напруга розподіляється між шаром і нафтою.

Еквівалентна схема представляється у вигляді послідовного з'єднання двох опорів $z_{\text{ш}}$ і $R_{\text{нафти}}$: де $Z_{\text{ш}} = \frac{1}{\omega \varepsilon} \equiv \frac{\delta}{f \varepsilon}$; δ – товщина діелектричного покриття, f – частота живлячої напруги, ε – діелектрична проникність діелектрика, $R_{\text{нафти}}$ – еквівалентний опір нафти.

Для того, щоб шар нафти перебував під впливом електричного поля необхідно, щоб на діелектричному покритті не виникало велике падіння напруги. Це досягається шляхом збільшення частоти f живлячої напруги або шляхом збільшення ε .

Високовольтні джерела високої частоти дорогі. Крім того, зі зростанням частоти напруги зменшується інтенсивність електрогідравлічних потоків через те, що не будуть створюватися надлишкові електричні заряди, які є джерелами цих потоків. В результаті інтенсивність злиття крапель падає.

Кращим рішенням виявилось застосування діелектричного покриття з кераміки з високим значенням ε .

Застосування газового зазору.

Застосування газового зазору ілюструється на рис. 11.10.

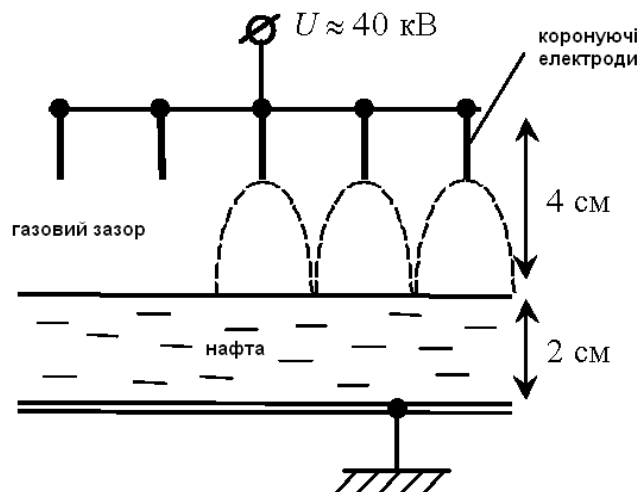


Рис. 11.10 – Схема процесу з повітряним зазором між поверхнею рідини і електродами

При подачі високої напруги на коронуючі електроди в газовому середовищі над поверхнею нафти утворюється коронний розряд. Рух носіїв зарядів в нафті викликає появу потоків в шарі рідини. В результаті виникає інтенсивне переміщення і взаємодія крапель, що приводить до їх злиття.

Спеціальні джерела високої напруги.

По залізницях нафту перевозять в цистернах. Після зливу нафти цистерни миють водою. В результаті утворюється вода, забруднена нафтою. Виникає задача відокремити від нафти і використовувати воду вдруге, а нафту за призначенням.

Для вирішення цього завдання застосовують джерела імпульсів високої напруги спеціальної форми (рис. 11.11).

Високовольтне джерело для апарату відділення води від нафти виробляє імпульсну напругу, яка використовується для руйнування нафтових оболонок на краплях води. Тривала постійна напруга забезпечує злиття крапель води.

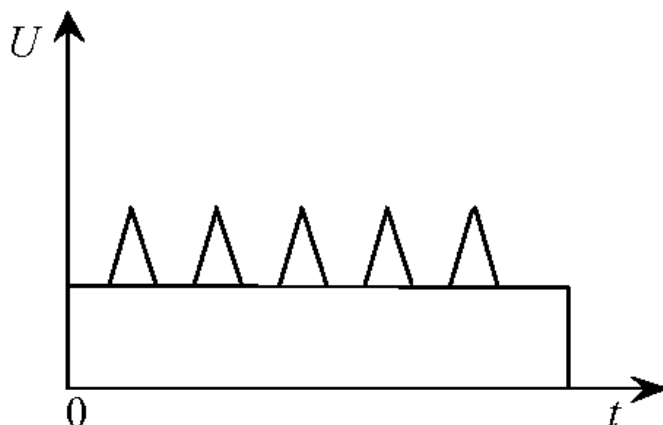


Рис. 11.11 – Форма живлячої напруги

ТЕМА 12 ТЕХНОЛОГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМО-ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ

Лекція №15 Плазмо-хімічні процеси та їх використання

12.1 Основи плазмохімічних перетворень

До цього моменту розглядалися атоми і молекули в повітрі, їх збудження, дисоціація, іонізація не акцентуючи увагу на хімічні перетворення, які відбуваються з цими частинками. Далі розглянемо процеси хімічних перетворень, які відбуваються з різними атомами, молекулами, активними радикалами і іонами, які виникають в процесі формування та розвитку електричного розряду в газі.

Всі фізико-хімічні процеси, які відбуваються в плазмі газового розряду, можна розділити на три часові інтервали:

1. $\Delta t \approx 10^{-15}$ с – на цьому інтервалі часу завершуються процеси збудження атомів і молекул електронним або фотонним ударом;
2. $\Delta t \approx 10^{-13}$ с – на цьому інтервалі часу завершуються процеси іонізації і дисоціації атомів і молекул;
3. Третій інтервал часу має змінну тривалість аж до $\Delta t \approx 10^{-3}$ с в залежності від складу газу, температури і тиску – це стадія хімічних процесів і реакцій.

12.1.1 Поняття кінетики хімічних реакцій

Хімічна кінетика – це вчення механізмів і закономірностей протікання в часі хімічних процесів. Під хімічною реакцією розуміється процес перетворення одного або декількох речовин (реагентів) в речовини (продукти реакції), що відрізняються від вихідних за хімічним або ізотопним складом, за будовою молекул або заряду.

У більшості випадків хімічний процес відбувається не шляхом прямого перетворення вихідних речовин в продукти реакції, а складається з декількох стадій. Кожну з цих стадій можна розглядати як самостійну хімічну реакцію зі

своїми вихідними речовинами і продуктами. Такі реакції називаються елементарними.

Найважливішими характеристиками хімічної реакції є ступінь перетворення (тобто відношення кількості речовини, що вступило у реакцію, до її початкової кількості) та швидкість реакції (тобто кількість речовини, що вступає в реакцію або утворюється в результаті реакції в одиницю часу в одиниці об'єму):

$$\omega = \pm \frac{dN}{dt},$$

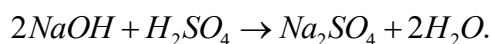
де N – число молей (або молекул) в одиниці об'єму.

Пояснимо сказане на прикладі реакції:



де A, B, C, D – реагенти і продукти реакції, а числа a, b, c, d – стехіометричні коефіцієнти, які визначають кількісні співвідношення, в яких речовини вступають в реакцію.

Наприклад:



У цій реакції: $NaOH$ і H_2SO_4 – реагенти; Na_2SO_4 і H_2O – продукти реакції. Стехіометричні коефіцієнти $a=2, b=1, c=1, d=2$ показують, що якщо в реакцію вступають два моля $NaOH$ і один моль H_2SO_4 , то ці речовини прореагують повністю і утвориться один моль Na_2SO_4 і два моля H_2O .

Швидкість зміни густини кожного реагенту або продукту реакції в ході такої реакції буде пов'язана зі швидкістю реакції наступним співвідношенням:

$$\omega = -\frac{1}{a} \frac{dN_A}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{dN_B}{dt} = \frac{1}{c} \frac{dN_C}{dt} = \frac{1}{d} \frac{dN_D}{dt}.$$

Для елементарних хімічних реакцій діє наступне узагальнене правило хімічної кінетики (закон діючих мас): швидкість елементарної хімічної реакції в кожен момент часу пропорційна добутку поточних концентрацій реагуючих речовин, взятих у степенях, рівних стехіометричним коефіцієнтам. Для реакції (12.1) вираз для швидкості реакції буде мати вигляд:

$$\omega = k_p \cdot (N_A)^a \cdot (N_B)^b,$$

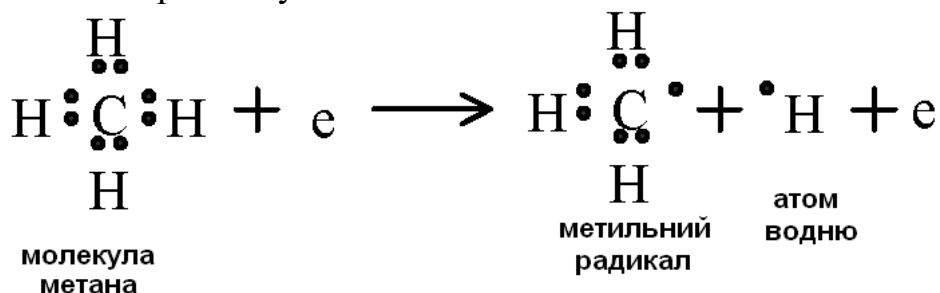
де k_p – константа швидкості реакції, незалежна від густини реагентів. Її ще називають питомою швидкістю реакції, оскільки при концентрації кожної з реагуючих речовин, що дорівнює одиниці, вона дорівнює фактично швидкості реакції.

Поняття константи швидкості реакції широко використовується в плазмохімічних технологіях при оцінці інтенсивності і ролі відбуття в них хімічних реакцій.

При протіканні реакції за стадіями виробляються і витрачаються так звані проміжні речовини, які зазвичай являють собою хімічно активні частинки – іони, збуджені молекули, вільні радикали. Вільні радикали – це молекули в особливому стані, коли відбувається розрив зв'язку між атомами, і ці молекули набувають, таким чином, вільні валентні зв'язки. У результаті вільні радикали отримують деяку надлишкову потенційну енергію у порівнянні з вихідними

молекулами. Як наслідок це призводить до збільшення хімічної активності. Вільні радикали існують дуже короткий час ($\sim 10^{-3}$ с).

Вільні радикали утворюються, наприклад, при взаємодії молекул з електронами в електричному полі:



Іони, вільні атоми і радикали мають неспарені електрони на зовнішній електронній оболонці і, в зв'язку з високою хімічною активністю, їх називають хімічно активними частинками. Збуджені молекули і атоми служать передавачами енергії від електронів плазми до активних (іонізуючим або дисоціюючим) атомам або молекулам.

Складні реакції складаються з простих реакцій (стадій), які можна в свою чергу класифікувати за декількома групами:

1. Необоротні реакції виду: $A \rightarrow B$. Хімічні реакції називаються незворотними, якщо речовини практично повністю перетворюються в кінцевий продукт. Найважливішою умовою незворотності хімічних реакцій є виділення одного з продуктів реакції у вигляді осаду, утворення газоподібного продукту реакції або утворення малодисоційованого продукту реакції (наприклад, води).

2. Двосторонні або зворотні реакції виду: $A \leftrightarrow B$. Більша частина хімічних реакцій є зворотна. Зворотними називаються такі хімічні реакції, які протікають при даній температурі в двох протилежних напрямках – прямому і зворотному.

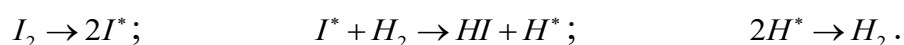
3. Паралельні реакції виду: $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$, $A \rightarrow L$;

4. Послідовні реакції виду: $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow L$.

Сам процес або акт хімічного перетворення полягає в тому, що при зближенні двох або декількох частинок відбувається поступова перебудова зв'язків між атомами. При цьому одні зв'язки розриваються, а інші утворюються. В результаті з вихідних речовин утворюються продукти реакції.

Стан, в якому одні зв'язки вже розтяглися, але ще не розірвалися, а нові тільки утворюються, називається перехідним станом. Сукупність частинок, що знаходяться в перехідному стані утворює, так званий, активований комплекс, який в перехідному стані знаходиться на вершині потенціального бар'єру.

Як приклад розглянемо хід реакції $H_2 + I_2 = 2HI$, яка, як показали сучасні дослідження, є складною реакцією, що складається з трьох елементарних реакцій:



Розглянемо більш докладно другу елементарну реакцію. В процесі протікання цієї реакції спочатку радикал йоду I^* зближується з молекулою водню, далі зв'язок між атомами водню розтягується і утворюється активний комплекс, що складається з атома йоду і двох атомів водню. І, нарешті,

формується зв'язок між атомом йоду і атомом водню і утворюється незв'язаний радикал водню.

Схематично шлях цієї реакції зображений на рис. 12.1.

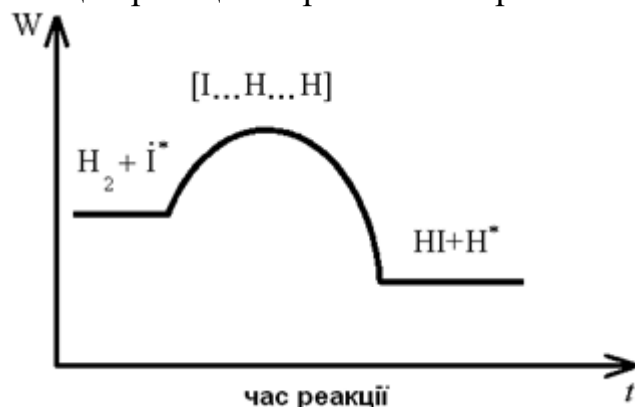


Рис. 12.1 – Схематичне зображення хімічної реакції на шкалі потенціальної енергії

Прикладами швидко протікаючих хімічних реакцій можуть служити реакції типу вибуху, а повільно протікаючих реакцій – реакції ферментації виноградного соку, які протікають від декількох місяців до декількох років.

На практиці швидкість хімічної реакції можна визначити графічно із залежності маси продукту хімічної реакції в одиниці об'єму від часу протікання реакції (рис. 12.2).

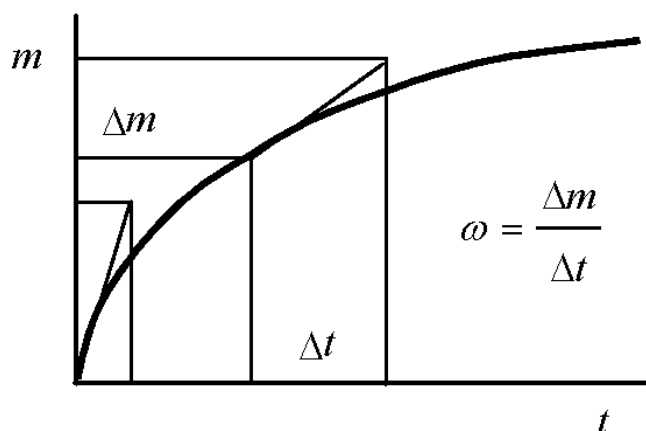


Рис. 12.2 – Залежність маси продукту реакції від часу реакції і визначення швидкості хімічної реакції

12.1.2 Особливості плазмохімічних, фотохімічних та радіаційно-хімічних реакцій

Швидкість більшості хімічних реакцій зростає з підвищенням температури. Це пов'язано з тим, що далеко не кожне зіткнення молекул реагуючих речовин призводить до хімічної реакції між ними. Для того щоб утворилися нові молекули, необхідно попередньо послабити або розірвати зв'язки між атомами в молекулах вихідних речовин. Для цього потрібно витрата певної кількості енергії. Підвищення температури означає збільшення хаотичного руху молекул. Залежність константи швидкості реакції від температури передає напівемпіричне рівняння Арреніуса:

$$k_p = Ae^{-E_a/RT},$$

де A – деяка константа, що залежить від вступаючих у реакцію речовин; R – газова стала; T – температура; E_a – так звана енергія активації реакції.

Енергією активації називають надлишкову енергію, яка повинна бути повідомлена молекулам для того, щоб їх зіткнення могло привести до утворення нової речовини (тобто відбулася хімічна реакція між цими частинками). Величина енергії активації залежить від виду реагуючих частинок і від їх енергетичного стану. Так, для реакцій між валентно-насиченими молекулами (атоми в молекулі мають повністю заповнену зовнішню електронну оболонку) енергія активації близька до енергії дисоціації і становить $100 \div 200$ кДж/моль.

Реакції атомів (або радикалів) з молекулами протікають з проміжними значеннями енергії активації ($40 \div 100$ кДж/моль). Реакції між атомами і радикалами (або між радикалами) відбуваються з енергією активації близькою до нуля.

Таким чином, хімічні реакції йдуть успішно тоді, коли реагенти набувають певну кількість енергії, і головною особливістю плазмохімічних реакцій є те, що в газорозрядній плазмі під дією різних зовнішніх впливів атоми і молекули мають можливість перейти в активні частинки: радикали, іони або збуджені частинки. Ця обставина дозволяє подолати потенціальний бар'єр для абсолютно нових елементарних хімічних реакцій, що забезпечує утворення абсолютно нових хімічних сполук, що ніколи не утворюються в даних умовах, або дозволяють створити зміну у швидкостях оборотних хімічних реакцій і тим самим створити умови для напрацювання таких продуктів реакції, які при нормальних умовах мають вкрай низькі рівноважні концентрації.

Наведемо практично важливі приклади використання плазмохімічних реакцій. Найбільше поширення набув електросинтез озону, тобто перетворення молекул кисню O_2 в молекули озону O_3 . Плазма газового розряду використовується для його отримання вже близько ста років. Весь цей час йшов безперервний процес пошуку більш раціональної форми газового розряду і умов протікання хімічних реакцій. Тому ці реакції на сьогоднішній день найбільш досліджені і є основою для подальших розробок.

Більше десятків років ведуться дослідження по застосуванню плазми газового розряду для очищення газових викидів теплових електричних станцій від оксидів азоту і сірки. Створено пілотні установки, ведуться активні дослідження і пошуки нових технічних рішень.

В останні роки розпочато роботи щодо використання плазми імпульсного газового розряду для очищення газових викидів лакофарбових, гальванічних і просочувальних виробництв від парів розчинників і компаундів на заміну енергоємних технологій високотемпературного допалювання.

12.2 Генератори озону і озонові технології

12.2.1 Фізико-хімічні та біологічні властивості озону

Озон – це друге відносно стійке з'єднання (алотропне) кисню. На відміну від молекули кисню, молекула озону складається з трьох атомів і має більш довгі зв'язки між атомами кисню (довжина зв'язку в молекулі озону 128 \AA , в той час як довжина зв'язку в молекулі кисню 121 \AA).

Фізичні властивості озону. Озон може існувати в усіх трьох агрегатних станах. При нормальних умовах озон – газ блакитного кольору. Температура кипіння озону дорівнює -112°C , а температура плавлення становить -192°C .

Слово озон в перекладі з грецького означає «пахучий» і ця назва справді відображає одну з особливостей озону, тому що його характерний запах проявляється вже при концентраціях $10^{-7} \div 10^{-8} \%$.

Завдяки своїй хімічній активності озон має дуже низьку граничнодопустиму концентрацію в повітрі (порівнянний з ГДК бойових отруйних речовин) $5 \cdot 10^{-8} \%$ або $0,1 \text{ мг/м}^3$.

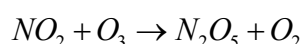
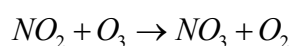
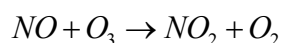
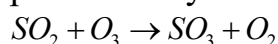
Хімічні властивості озону.

1. Озон на відміну від атомарного кисню є відносно стійким з'єднанням. Він мимовільно розкладається при високих концентраціях, при цьому чим вище концентрація, тим вище швидкість реакції розкладання. При концентраціях озону $12 \div 15\%$ озон може розкладатися з вибухом. Слід також зазначити, що процес розкладання озону прискорюється із зростанням температури, а сама реакція розкладання $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2 + 68 \text{ ккал}$ екзотермічна і супроводжується виділенням великої кількості тепла.

2. Озон є одним з найсильніших природних окислювачів. Окислювальний потенціал озону становить $2,07 \text{ В}$ (для порівняння у фтору $2,4 \text{ В}$, а у хлору $1,7 \text{ В}$).

Озон окислює всі метали за винятком золота і групи платини.

Озон доокислює оксиди сірки та азоту:



Озон окисляє аміак з утворенням нітриту амонію:



Озон активно вступає в реакцію з ароматичними сполуками з руйнуванням ароматичного ядра. Зокрема озон реагує з фенолом з руйнуванням ядра.

Озон активно взаємодіє з насиченими вуглеводнями з руйнуванням подвійних вуглецевих зв'язків.

Взаємодія озону з органічними сполуками знаходить широке застосування в хімічній промисловості і в суміжних галузях. Використання реакції озону з неграничними сполуками дозволяє отримувати штучним шляхом різні жирні кислоти, амінокислоти та полімерні матеріали. Реакції озону з ароматичними вуглеводнями – дифенілову кислоту, фталевий діальдегід і фталеву кислоту та ін.

Реакції озону з ароматичними сполуками лягли в основу технологій дезодорації різних середовищ, приміщень та стічних вод.

Біологічні властивості озону. Незважаючи на велику кількість досліджень механізм недостатньо розкритий.

Відомо, що при високих концентраціях озону спостерігаються ураження дихальних шляхів, легень і слизової оболонки. Тривала дія озону призводить до розвитку хронічних захворювань легень і верхніх дихальних шляхів.

Вплив малими дозами озону надає профілактичну і терапевтичну дію і починає активно використовуватися в медицині.

Озон впливає на всі мікроорганізми, руйнуючи мембрану і окислюючи протоплазму. При цьому слід відзначити, що концентрації озону, які згубні для простих мікроорганізмів, на кілька порядків нижче, ніж для більш високоорганізованих.

12.2.2 Основні способи отримання озону

Озон утворюється з кисню. Існує кілька способів отримання озону, серед яких найбільш поширеними є: електролітичний, фотохімічний і електросинтез в плазмі газового розряду.

Електролітичний метод синтезу озону здійснюється в спеціальних електролітичних осередках. В якості електролітів використовуються розчини різних кислот та їх солі (H_2SO_4 , $HClO_4$, $NaClO_4$, $KClO_4$).

Утворення озону відбувається за рахунок розкладання води і утворення атомарного кисню, який приєднавшись до молекули кисню утворює озон і молекулу водню. Цей метод дозволяє отримати концентрований озон, проте він дуже енергоємний, і тому він не знайшов широкого поширення.

Фотохімічний метод отримання озону являє собою найбільш поширений в природі спосіб. Утворення озону відбувається при дисоціації молекули кисню під дією короткохвильового УФ випромінювання. Цей метод не дозволяє отримувати озон високої концентрації. Прилади, засновані на цьому методі, отримали поширення для лабораторних цілей, в медицині і харчовій промисловості.

Електросинтез озону набув найбільшого поширення. Цей метод поєднує в собі можливість отримання озону високих концентрацій з великою продуктивністю і відносно невисокими енерговитратами.

Лекція №16 Процеси електросинтезу та промислові генератори озону

Електросинтез озону

В результаті численних досліджень з використання різних видів газового розряду для електросинтезу озону поширення набули апарати, які використовують три форми розряду:

1. *Бар'єрний розряд* – отримав найбільше поширення, являє собою велику сукупність імпульсних мікророзрядів в газовому проміжку довжиною $1 \div 3$ мм між двома електродами, розділеними одним або двома діелектричними бар'єрами при живленні електродів змінною високою напругою частотою від 50 Гц до декількох кілогерц.

2. *Поверхневий розряд* – близький за формою до бар'єрного розряду, що одержав поширення в останнє десятиліття завдяки своїй простоті і надійності.

Так само являє собою сукупність мікророзрядів, що розвиваються уздовж поверхні твердого діелектрика при живленні електродів змінною напругою частотою від 50 Гц до $15 \div 40$ кГц.

3. *Імпульсний розряд* – як правило стримерний коронний розряд, що виникає в проміжку між двома електродами при живленні електродів імпульсною напругою тривалістю від сотень наносекунд до одиниць мікросекунд.

З великого числа різних сучасних конструкцій озонаторів, що використовують електричний розряд для отримання озону, найбільшого поширення набули озонатори з так званим бар'єрним розрядом. Продуктивність однієї установки може становити від грамів до 150 кг озону на годину.

Бар'єрним розрядом називають розряд у вузькому газовому зазорі між плоскими або коаксіальними електродами, один з яких (або обидва) покритий шаром твердого діелектрика (рис. 12.3) Якщо до електродів докладено змінну напругу з амплітудою, що перевищує пробивну напругу газового проміжку, то в ньому виникає розряд, що складається з великого числа окремих іскор, дискретних в просторі і в часі. Розряд продовжується до тих пір, поки миттєве значення напруги на електродній системі не досягне U_{\max} . Особливістю бар'єрного розряду є локальне накопичення заряду на поверхні діелектричного бар'єру в процесі розвитку в проміжку кожної окремої іскри.

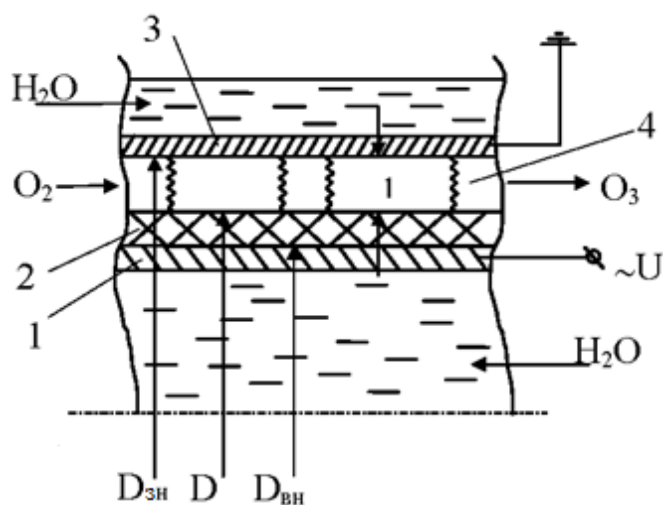


Рис. 12.3 – Електродна система озонатора, де
1, 3 – електроди; 2 – діелектричний бар'єр; 4 – зона розряду

Розглянемо детальніше вказане явище. Нехай до проміжку з бар'єром докладено змінну напругу, при якій ще немає розряду. Ця напруга розподіляється по ємностям бар'єру та газового проміжку, так що до газового проміжку прикладена напруга

$$U_r = U \frac{C_6}{C_r + C_6},$$

де U – напруга на електродах; C_6 – ємність бар'єра; C_r – ємність газового проміжку.

Для циліндричної системи електродів

$$C_{\delta} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\delta} \frac{L}{\ln \frac{D}{D_{\text{вн}}}}; \quad C_{\text{г}} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_{\text{г}} \frac{L}{\ln \frac{D_{\text{зн}}}{D}},$$

де ϵ_{δ} і $\epsilon_{\text{г}}$ – діелектричні проникності бар'єру і газу; L – довжина електродів; $D_{\text{зн}}$, D , $D_{\text{вн}}$ – діаметри електродів (рис. 12.3).

Розглянемо перший напівперіод впливаючої напруги, коли електрод з діелектриком є анодом (Рис. 12.4, *а*). Коли напруженість зовнішнього поля $E_{\text{зовн}}$, створена прикладеною напругою, досягне значення початкової напруженості, у проміжку починаються інтенсивні іонізаційні процеси і створюється велика кількість лавин, які просуваються у напрямку до діелектричного бар'єра.

Розрахунки показують, що при нормальній густині газу в розрядному проміжку довжиною $l = 1 - 3$ мм розвиток лавин може привести до створення об'ємних зарядів з густиною N , при якій виконується умова переходу лавини в стример (кількість електронів в лавині досягає 10^8). При виконанні цієї умови в якомусь місці проміжку виникає стримерний канал, головка якого доходить до поверхні електрода, покритого діелектричним бар'єром.

Відбувається пробій газового проміжку за багатолавинно-стримерним механізмом. Зовні розряд виглядає як іскра. Цьому процесу відповідає напруга $U_{\text{пр}}$.

В ході утворення і руху лавин і, особливо, при підході до діелектричного бар'єра головки стримера, на поверхню бар'єру осідають негативні заряди – електрони. Діаметр каналу стримера становить при розглянутих умовах $\approx 0,1$ мм. Приблизно таких же розмірів виявляється і пляма заряду, що осів на бар'єр. Що стосується позитивних іонів, які утворилися при розвитку лавин, то, маючи набагато меншу рухливість, вони поступово зміщуються в бік металевого катода. Підходячи до нього, вони нейтралізуються. Накопичення негативного заряду на поверхні діелектричного бар'єру викликано великим об'ємним опором матеріалу бар'єру (порядку $10^{14} \div 10^{16}$ Ом·см). Великий поверхневий опір перешкоджає розтіканню заряду по поверхні.

Утворюється заряджений диск з максимальною густиною заряду в центрі диска. Заряджений диск створює поле, що має як нормальну $E_{\text{ос}}$, так і тангенціальну $E_{\text{пов}}$ складові. Під дією останньої складової вздовж поверхні бар'єру починається поверхневий розряд лавинного типу. У розглянутому нами випадку негативно зарядженого диска поверхневий розряд створює круглу пляму негативного заряду з діаметром, у багато разів перевищуючи діаметр початкового заряду. Одиночний розряд в проміжку може створити пляму діаметром до $15 \div 17$ мм (рис. 12.4, *а*).

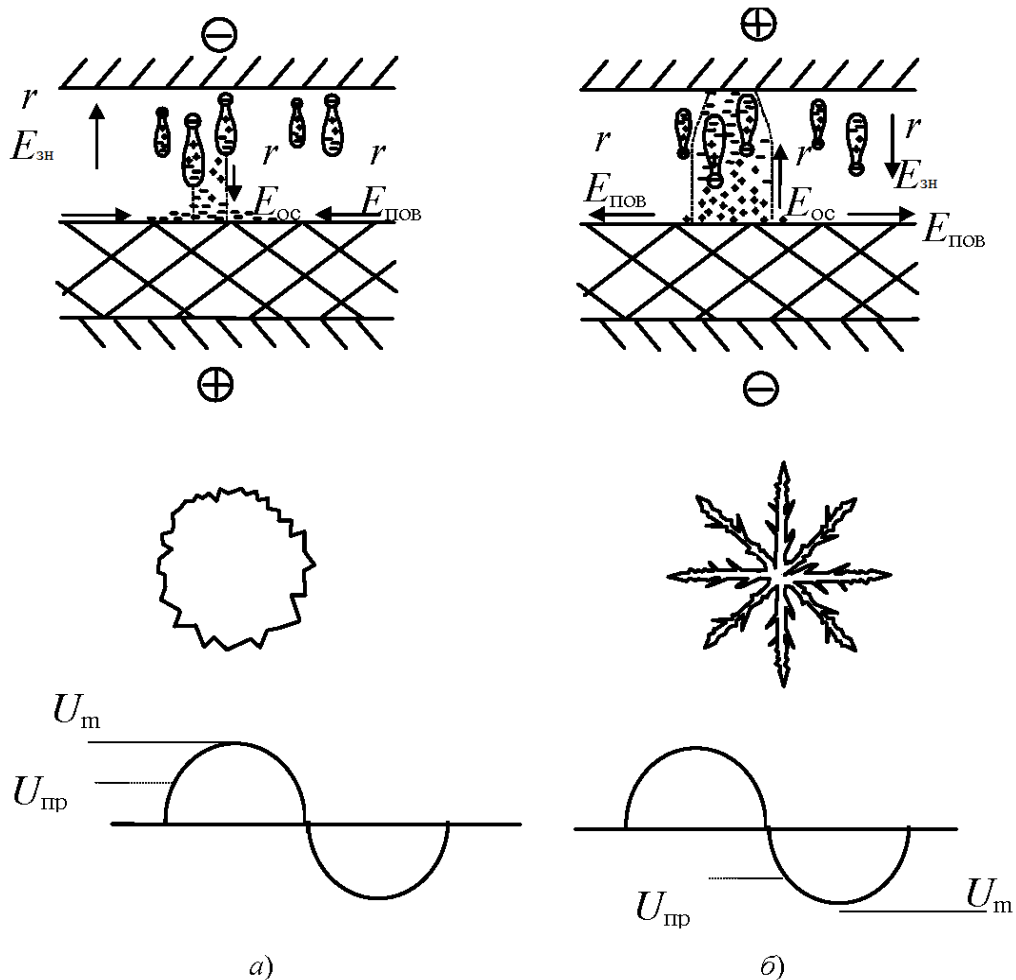


Рис. 12.4 – Розвиток розряду в проміжку озонатора

Пляма негативного заряду, що утворилася на бар'єрі після поверхневого розряду, створює в розрядному проміжку своє поле з нормальною складовою напруженості $E_{ос}$, спрямовану зустрічно до прикладеного зовнішнього поля. Вимірювання і розрахунки показують, що напруженість $E_{ос}$ може досягати декількох кВ/см. У підсумку сумарне поле в проміжку $E_{\Sigma} = E_{зн} - E_{ос}$ знижується, і іонізаційні процеси в цій частині проміжку припиняються. Розряд гасне. Весь описаний процес займає час до десяти наносекунд, за який прикладена напруга не встигає змінитися. Одночасно починається розвиток стримера в іншій частині проміжку, де процес повторюється.

Утворення в різних точках іскор і їх згасання буде продовжуватися до тих пір, поки прикладена напруга не досягне максимального значення U_m . Після цього розряд в проміжку припиняється. Осцилограма струму через проміжок виглядає так, як показано на рис. 12.5, де на криву струму зміщення $I_{зм}$ накладені імпульси струму окремих іскор.

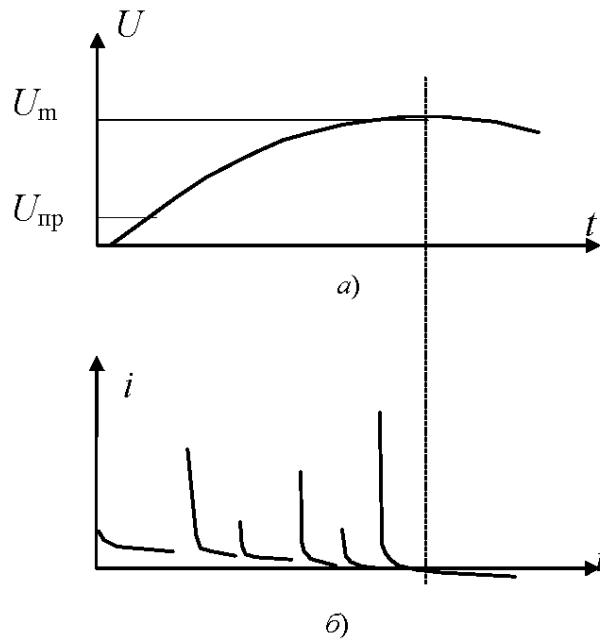


Рис. 12.5 – Осцилограми струму і напруги, де *а)* осцилограма напруги на електродах; *б)* осцилограма струму через озонатор

Розглянемо тепер напівперіод, коли електрод з діелектричним бар'єром є катодом. При цьому знову розглядається найперший напівперіод, при якому розвиток розряду в проміжку починається при відсутності заряду на діелектрику.

Розвиток розряду йде в цьому випадку в напрямку металевого електрода. Знову утворюється стример, але при підході його головки до аноду всі електрони йдуть у метал. Накопичення заряду на аноді не відбувається. Але розвиток розряду йде і в сторону катода, до якого переміщуються позитивно заряджені іони. Підходячи до бар'єра, вони осідають на ньому, утворюючи позитивний заряд, який є причиною виникнення поверхневого розряду. В даному випадку поверхневий розряд носить стримерний характер і на поверхні бар'єру залишається пляма у вигляді зірочки (Рис. 12.4, б), максимальна напруженість поля E_{oc} , також становить кілька кВ/см. В результаті сумарна напруженість поля в проміжку знижується і розрядні процеси в цій частині проміжку припиняються. Діаметр зірочок одиночних розрядів досягає $20 \div 25$ мм. Коли напруга на проміжку досягає U_m , розряд припиняється.

Інакше йде справа, коли розряд розвивається в проміжку, в якому на діелектричному бар'єрі вже є заряд, що залишився від попереднього напівперіоду. Оскільки поверхневий опір матеріалу бар'єру дуже великий, заряд не встигає релаксувати за час одного періоду. Розподіл зарядів на поверхні до початку розряду в даний напівперіод залишається практично тим же, як в момент закінчення розряду в попередній напівперіод. Це означає, що в новий напівперіод поле осівших зарядів складається із зовнішнім полем, посилюючи його. Тому в місцях, де розташовані плями або зірочки осівших зарядів, напруженість поля досягає початкової E_n раніше, ніж в іншій частині проміжку. Розвиток іонізаційних процесів і розрядів виявляються «прив'язаними» до місць розряду в попередній напівперіод.

Утворення в різних точках іскор і їх згасання буде продовжуватись до тих пір, поки прикладена напруга не досягне максимального значення U_m . Після цього розряд в проміжку припиняється. Осцилограма струму через проміжок виглядає так, як показано на рис. 12.5, де на криву струму зміщення I_{zm} накладені імпульси окремих іскор.

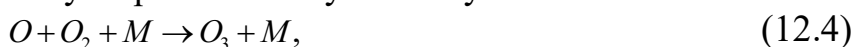
Картина розряду в проміжку стає ще більш складною після тривалого впливу змінної напруги. Але є певні закономірності, які проявляються в усіх випадках: у кожен напівперіод розряд має вид окремих, швидко затухаючих іскор. Розряд починається, коли напруга, прикладена до електродної системи, менше розрядної напруги газового проміжку. У кожен напівперіод утворюються імпульси струму, число і амплітуда яких є статистичними величинами.

В процесі розвитку кожної окремої іскри відбуваються електрохімічні реакції, результатом яких є утворення озону і його розкладання. Процес утворення озону складається з декількох етапів, хоча в загальному випадку число реакцій, пов'язаних з утворенням озону і його розкладанням, перевищує 70, існують основні, без проходження яких отримання озону неможливо. Основною реакцією є процес дисоціації молекул кисню при взаємодії з вільним електроном:



постійна часу цього процесу дуже мала і становить одиниці наносекунд.

Наступний етап полягає в утворенні молекули озону



в якій бере участь третя частинка M : молекула, іон, електрон чи атом в нейтральному або збудженому стані. Дослідження показують, що утворення озону потребує часу до 10 мкс.

Крім утворення озону, при русі частинок газу відбувається розкладання молекул O_3 по реакції



Ця реакція йде тим інтенсивніше, чим вище температура газу.

Утворений в зоні розряду озон дифундує в сусідні області. В результаті проходження робочого газу через розрядну зону озонатора на виході виходить озоно-повітряна або озоно-киснева суміш з концентрацією озону ($10^{-1} \div 10$) г/м³, при цьому одержувана кількість озону залежить від перевищення інтенсивності утворення над інтенсивністю розкладання.

Розглянутий механізм розвитку розряду в однорідному полі проміжку з діелектричним бар'єром на електроді дозволяє встановити ті особливості, через які бар'єрний розряд став одним з основних джерел озону. Головна особливість – дискретність розрядних процесів в просторі і в часі. Протягом частини кожного напівперіоду впливаючої напруги розряд розподілений по всьому проміжку. Це дозволяє інтенсивно охолоджувати всю розрядну зону охолодженням електродів, що особливо важливо для запобігання термічного розкладання вже утвореного озону. Бар'єрний розряд, крім того, є найбільш раціональною формою розряду і для утворення озону. Бар'єр виступає в ролі струмообмежувального опору для кожної окремої іскри, що запобігає

утворенню великого струму, тобто втратам енергії на розігрів розрядного каналу. Разом з тим, в такому розряді процеси дисоціації молекул кисню йдуть з найбільшою інтенсивністю, що забезпечується маючим місце розподілом по енергіях вільних електронів.

Утворення іскри в кожній області проміжку, де напруженість поля перевищить пробивну і затухання цієї іскри через спад напруженості поля, викликаного осілими зарядами, підтримує на електродах практично незмінну напругу на газовому проміжку U_r протягом усього часу горіння розряду в даний напівперіод. Тому середня напруженість поля в газовому проміжку протягом усього часу горіння розряду лише незначно відрізняється від початкової. Сталість напруженості забезпечує при розряді стабільний розподіл електронів по енергіях, що важливо для проходження електрохімічних реакцій утворення озону.

З ростом прикладеної напруги час горіння розряду в кожен напівперіод збільшується, збільшується число іскор і зростає вихід озону. Однак майже пропорційне зростання виходу озону з ростом напруги триває до певної межі (рис. 12.6). З ростом числа іскор збільшується температура розрядної зони, посилюється розкладання озону. Робота озонатора при перегріві стає неефективною. Тому робочий режим озонатора повинен лежати в області лінійної частини кривої залежності концентрації озону C_{O_3} від напруги.

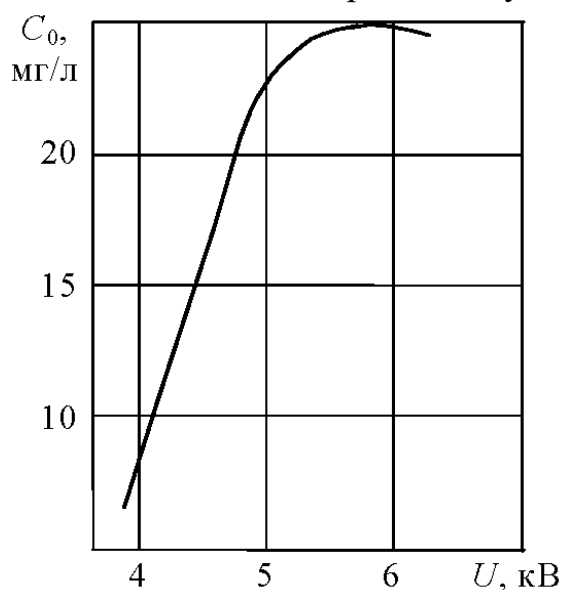


Рис. 12.6 – Вихід озону в залежності від напруги частоти $f = 1500$ Гц; витрата газу $V_r = 1$ л/хв.

Наведений вище опис процесів в озонаторі відображає тільки фізичну картину в газовому проміжку. Для електричного кола, що включає джерело живлення і озонатор, останній представляє складне навантаження, яке змінюється при кожному запалюванні розряду. Аналіз процесів в еквівалентному електричному колі, що містить озонатор, дозволяє зв'язати фізичні процеси з електричними величинами, що визначають ці процеси.

В еквівалентній електричній схемі озонатор може бути представлений двома послідовно включеними ємностями: ємністю газового проміжку і ємністю бар'єру, як це було визначено раніше.

Нехай до озонатора прикладено змінну напругу

$$U = U_0 \sin \omega t. \quad (12.6)$$

До початку розряду в газовому проміжку, тобто при напрузі $U_r < U_{пр}$, прикладена напруга розподіляється по ємностям газового проміжку і бар'єру: $U = U_r + U_6$, причому

$$U_6 = U \frac{C_r}{C_r + C_6}; \quad U_r = U \frac{C_6}{C_r + C_6}. \quad (12.7)$$

Струм через озонатор дорівнює:

$$i = U_0 \omega \frac{C_6 C_r}{C_6 + C_r} \cos \omega t. \quad (12.8)$$

Коли напруга на газовому проміжку стане достатньою для його пробою, в проміжку починається розряд, напруга на газовому проміжку стає рівною напрузі горіння розряду $U_{гор}$ і не змінюється поки горить розряд. Тоді напруга на діелектричному бар'єрі може бути визначена як

$$U_6 = U_0 \sin \omega t - U_{гор}. \quad (12.9)$$

Струм через озонатор при розряді:

$$I = \frac{d}{dt}(C_6 \cdot U_6) = U_0 \cdot \omega \cdot C_6 \cdot \cos \omega t. \quad (12.10)$$

Так як $\epsilon_6 > \epsilon_r$, то сумарна ємність озонатора менше ємності бар'єру, і при виникненні розряду струм стрибком зростає.

Як вже говорилося вище, крива струму через озонатор при розряді має складну форму, що враховує імпульси струму окремих розрядів. Тому зазвичай користуються поняттям середнього струму через озонатор при розряді, відповідному двохнапівперіодній схемі випрямлення

$$I_{сер} = (U_0 - U_{гор}) \frac{2}{\pi} \omega C_6. \quad (12.11)$$

Дуже важливою характеристикою, що визначає не тільки інтенсивність іонізаційних процесів в газовому проміжку, а й ефективність утворення озону, є активна потужність розряду P , із зростанням якої вихід озону зростає. Правильна оцінка активної потужності при роботі озонатора дозволяє визначити ефективність роботи пристрою в цілому.

Розрахунок активної потужності в колі змінного струму проводиться за рівнянням:

$$P = \frac{1}{T} \int i U dt = \frac{1}{2\pi} \int i U d(\omega t). \quad (12.12)$$

Якщо цей інтеграл розбити на ділянки, відповідно інтервалам, коли розряд в проміжку є і коли його немає, і на кожній ділянці використовувати свої рівняння для напруги та струму, то можна отримати рівняння для активної потужності виду:

$$P = U_{гор} \left[\frac{2(U_0 - U_{гор}) C_6 \omega}{\pi} - \frac{2U_r \omega C_r}{\pi} \right], \quad (12.13)$$

де перший доданок в квадратних дужках відповідає середньому по схемі двохнапівперіодного випрямлення струму через озонатор при горінні розряду, а другий доданок – середньому струму в момент запалювання розряду, коли напруга на проміжку стає рівною пробивній. З невеликою похибкою це напруга можна вважати рівною напрузі горіння розряду. Струм, що відповідає цій напрузі, називають критичним.

Тоді рівняння для потужності набуває виду:

$$P = U_{\text{гор}} (I_{\text{сер}} - I_{\text{кр}}). \quad (12.14)$$

Це рівняння використовується для визначення потужності при побудові вольт-амперної характеристики озонатора.

Метод полягає в тому, що вимірюють випрямлений за схемою двохнапівперіодного випрямлення струм через озонатор при змінній напрузі, прикладеній до електродів, і будують вольт-амперну характеристику $I = f(U)$. До початку розряду ця характеристика має вигляд прямої з нахилом, обумовленої опором всього озонатора (рис. 12.7). Після запалювання розряду струм визначається в основному ємністю бар'єру, і нахил прямої змінюється. Точка зламу відповідає критичному режиму, при якому струм дорівнює $I_{\text{кр}}$. Якщо продовжити розрядну частину вольт-амперної характеристики до перетину з віссю напруги, то точка перетину дає напругу горіння розряду $U_{\text{гор}}$.

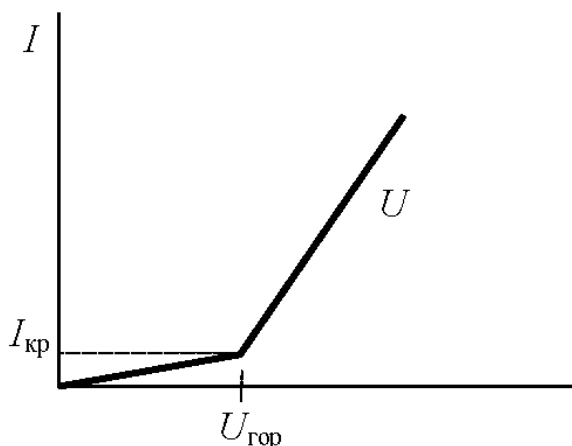


Рис. 12.7 – Вольт-амперна характеристика озонатора

Знаючи значення $I_{\text{кр}}$ і $U_{\text{гор}}$, можна знайти потужність для будь-якого значення напруги за відповідним значенням $I_{\text{сер}}$.

Основними параметрами, що визначають ефективність роботи бар'єрного озонатора, є: напруга на електродах U ; газовий зазор l (ця величина визначає характер розряду і його інтенсивність); діелектрична проникність матеріалу бар'єру ϵ_0 ; частота f впливаючої напруги і витрата газу $V_{\text{г}}$, що визначає концентрацію озону в газовій суміші з озонатора.

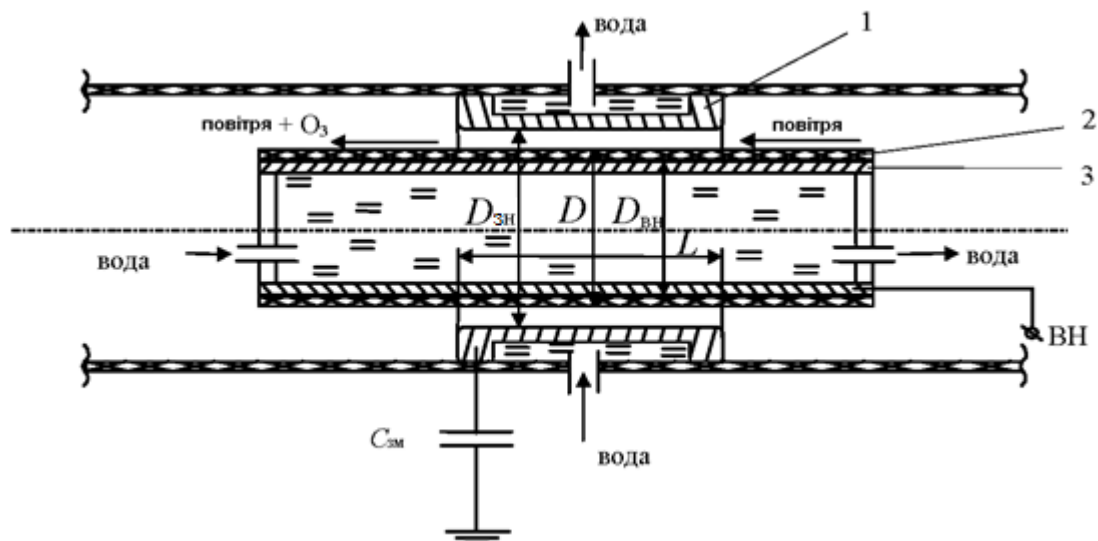


Рис. 12.8 – Трубчастий бар'єрний озонатор, де
1 – зовнішній електрод; 2 – бар'єр із скло-емалі; 3 – внутрішній електрод

Для виведення озону, який утворився, з розрядного проміжку необхідно створити рівномірний потік газу через розрядну зону. Найбільш зручно це здійснюється в коаксіальній системі електродів, так званого, трубчастого озонатора (рис. 12.8).

Від швидкості протікання газу через озонатор, або від витрати газу V_r (л/хв) залежить час перебування кожного одиничного об'єму газу в зоні розряду. Це означає, що число розрядів, що розвиваються в кожному одиничному об'ємі газу при русі його вздовж озонатора залежить від V_r , тобто концентрація озону на виході з озонатора залежить від витрати газу.

З витратою газу пов'язана продуктивність озонатора

$$G = C_{O_3} \cdot V_r, \quad (12.15)$$

вимірювана в грамах (або кілограмах) озону на годину. Поряд з концентрацією озону в повітрі на виході озонатора C_{O_3} (г/л) продуктивність G є важливою характеристикою озонатора.

Наступною важливою величиною, що визначає ефективність роботи озонатора, є питомі витрати енергії на отримання озону

$$W = \frac{P}{G} \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}.$$

Ця величина має особливо важливе значення для промислових озонаторів з продуктивністю до 150 кг/год.

Лекція №17 Області використання озонових технологій

12.2.3 Технологічне застосування озону

В даний час 95 % питної води в Європі проходить озонну підготовку. У США йде процес переведення з хлорування на озонування.

В останні 20 років області застосування озону значно розширилися і в усьому світі ведуться нові розробки. В таблицю 12.1 зведені та класифіковано основні технологічні застосування озону. Слід звернути увагу на те, що настільки бурхливого розвитку технологій з використанням озону сприяє його

екологічна чистота. На відміну від інших окислювачів озон в процесі реакцій розкладається на молекулярний і атомарний кисень і граничні оксиди. Всі ці продукти, як правило, не забруднюють навколишнє середовище і не призводять до утворення канцерогенних речовин, як наприклад при окисленні хлором або фтором.

Таблиця 12.1 Основні області технологічного застосування озону

Очищення природних і стічних вод	Очищення газових викидів	Сільське господарство і харчова промисловість	Медицина і ветеринарія	Хімічна промисловість	Побутові застосування
Централізовані і системи підготовки питної води	Очищення газових викидів ТЕС від оксидів азоту і сірки	Підготовка води і кормів для тваринництва	Озонотерапія і профілактика профзахворювань	Видобуток рідкісних металів та їх виділення з стічних вод	Кондиціонування повітря приміщень
Автономні системи підготовки питної води	Очищення повітря приміщень лакофарбової і інш. виробництв	Дезінфекція тари, приміщень і обладнання	Застосування в хірургії та післяхірургічній профілактиці	Синтез нових полімерів	Очищення води в плавальних басейнах
Очищення промислових стічних вод	Санація повітря приміщень промислових підприємств	Зберігання та транспортування продуктів харчування	Стерилізація медичного інструменту та обладнання	Органічний синтез і біотехнології	Консервування харчових продуктів
Очищення біологічно забруднених вод		Промислове інтенсивне рибицтво	Санація повітря приміщень для боротьби з внутрішньо-лікарневими інфекціями	Відбілювання целюлози і тканин	Дезодорування повітря в рефрижераторах, пілососах і т.д.

1) Підготовка питної води. Застосування озону для підготовки питної води відноситься до найраніших використань окислювальних і дезінфікуючих властивостей озону. Спочатку озон використовувався тільки для знезараження, потім його стали застосовувати для видалення запаху, зміни кольоровості води та усунення домішок.

Знезараження – це видалення з води бактерій, спор, мікробів і вірусів (інактивація). Для видалення бактерій у воду вводять дезінфікуючу речовину. Чим більше дезінфікуючої речовини введено, тим ефективніше її вплив на бактерії. Доза дезінфікуючої речовини (мінімальна кількість дезінфікуючої речовини в міліграмах, яку необхідно для інактивації одного літра оброблюваної води) варіюється в залежності від вмісту у воді органічних речовин, від температури води і від величини активної реакції води з дезінфікуючою речовиною – рН. На рис. 12.9 наведено графік залежності кількості бактерій, що містяться у воді, від величини дози впливаючої дезінфікуючої речовини (в нашому випадку хлору D_{cl} і озону D_{oz}).

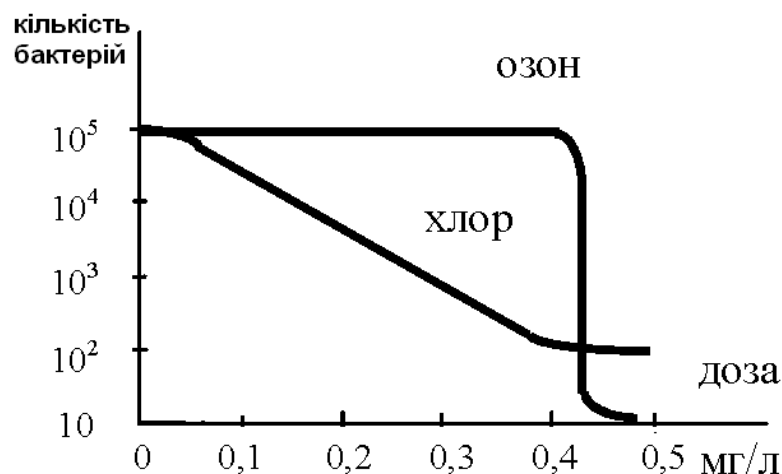


Рис. 12.9 – Кількість бактерій у воді в залежності від дози дезінфектанту

З графіка видно, що при використанні хлору, чим більше його дозування в оброблювану воду, тим менша кількість бактерій виживає. Для озону виявляється різка бактерицидна дія при досягненні критичної дози озону рівною $0,4 \div 0,5$ мг озону в газі на літр оброблюваної води. Причому, відбувається повна інактивація води.

Механізм впливу окислювача полягає в руйнуванні бактерій шляхом інактивації бактерійних протеїнів, тобто дифузії через мембрану клітини в цитоплазму з ураженням життєвих центрів бактерій.

Дослідження механізму озонування бактерій показали, що дія його відбувається швидко за умови підтримки потрібної концентрації розчиненого озону в воді протягом певного часу. Якщо озон ефективно впливає на бактерії, то хлор виробляє тільки вибіркове отруєння життєвих центрів бактерій, причому досить повільне через необхідність тривалого часу для дифузії в цитоплазмі.

Час необхідний для зниження концентрації бактерій до допустимої величини, яка характеризується Колі-індексом, називається часом інактивації.

Для хлору час інактивації становить 30 хв при утриманні залишкового хлору у воді в межах $C_{\text{вCl}} = 0,05 \div 0,2$ мг/л.

Для озону цей час становить 12 хв при утриманні розчиненого озону в воді $C_{\text{вO}_3} = 0,1 \div 0,3$ мг/л.

У Франції для інактивації води прийнято час рівний 4 хв при концентрації озону в воді $C_{\text{вO}_3} = 0,4$ мг/л.

Враховуючи, що час інактивації в сильній степені залежить від концентрації залишкового озону в воді, в США введено в практику використання так званого СТ – фактора [мг/л·хв], який встановлює зв'язок між необхідним часом інактивації і концентрацією розчиненого озону в воді.

Таблиця 12.2 Залежність СТ-фактора від степеня інактивації води та її температури (рН=6÷9)

Рівень	Температура води, °C
--------	----------------------

інактивації	0,5	5	10	15	20	25
0,5	0,53	0,44	0,37	0,27	0,2	0,13
1,0	1,13	0,67	0,53	0,47	0,35	0,2
2,0	2,2	1,33	1,13	0,87	0,67	0,53
3,0	3,0	2,0	1,67	1,3	1,0	0,67

З табл. 12.2 видно, що чим вище рівень (порядок зниження кількості бактерій у воді) інактивації води, тобто менша кількість бактерій повинна залишитися в воді, тим більше повинно бути значення СТ-фактора. Крім того, чим вище температура води, тим менше СТ-фактор. Наприклад, при температурі води + 25 °С і залишковій концентрації озону у воді 1 мг/л для інактивації на три порядки необхідний час обробки води озоном, рівний 0,67 хв.

Крім великої здатності знищення бактерій озон має високу ефективність у знищенні спор, цист (щільні оболонки, що утворюються навколо одноклітинних організмів, наприклад, джгутикових і кореніжок, при їх розмноженні, а також в несприятливих для них умовах) і багатьох інших патогенних мікробів.

Обезбарвлення – це видалення з води органічних і хімічних речовин, офарблюючих воду. В залежності від кольоровості вихідної води потрібно більшу або меншу кількість озону для знебарвлення води.

Для південних районів, де вихідна кольоровість води значно більше, потрібно вже доза озону, рівна 8 мг/л (див. рис. 12.10).

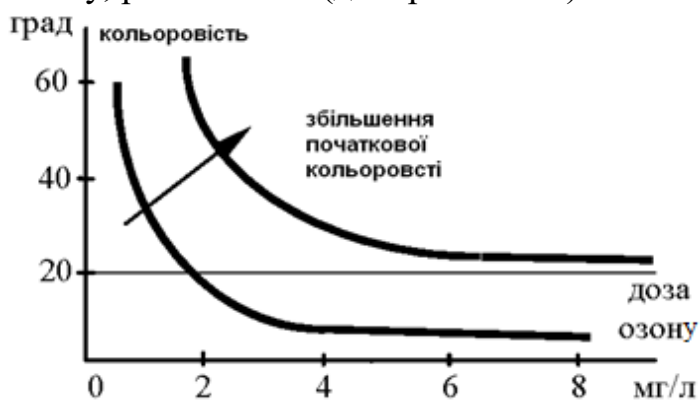
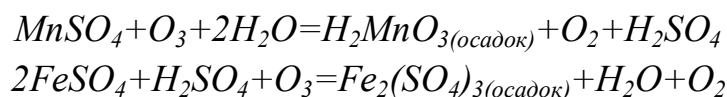


Рис. 12.10 – Залежність знебарвлення води від дозування озону

Фізичний механізм впливу озону при знебарвленні води полягає, по-перше, в розкладанні речовин до найпростіших H_2O і CO_2 , по-друге, в коагуляції (об'єднанні) речовин з подальшим випаданням їх в осад.

Ефективне знебарвлення води озонуванням є одним з визначальних критеріїв у виборі озону в якості діючого реагенту при підготовці питної води.

Видалення заліза та марганцю. У природних водах найбільш часто зустрічається залізо в двовалентній формі, що знаходиться в розчиненому стані. Марганець в природній воді зазвичай супроводжує залізо. Обидві ці речовини надають воді кольоровість і характерний присмак. Озон легко окисляє солі заліза і марганцю з утворенням нерозчинних речовин, які видаляються відстоюванням або фільтрацією. Хімічні реакції сульфідів заліза і марганцю з озоном можна записати у вигляді:



Якщо залізо і марганець містяться у формі органічних сполук або колоїдальних частинок (з розміром $0,1 \div 0,01$ мкм), то знезалізнення і деманганація води звичайними способами не вдається. В цьому випадку необхідно попереднє окислення цих комплексних органічних сполук, що приводить до їх розщеплення, після чого стає можливим видалення заліза і марганцю одним із звичайних методів. Окислюючи комплексні сполуки, озон перетворює розчинні солі в нерозчинні, тому необхідно подальше фільтрування води для звільнення її від осадків, що випадають.

Слід зазначити, що хоча озонування і не є найбільш економічним методом знезалізнення і деманганації, але застосування озону з цими цілями виправдано в двох випадках: по-перше, коли звичайні способи видалення з води заліза і марганцю не дають результатів або ведуть до недостатніх результатів, по-друге, коли необхідно одночасне усунення запахів, присмаків і кольоровості води.

Усунення присмаків і запахів води. Неприємні присмаки і запахи в деяких природних водах викликаються присутністю сполук мінерального і органічного походження, що знаходяться в розчиненому або колоїдному стані. Ці присмаки за своїм походженням можуть бути:

- а) мінерального походження, тобто викликаються наявністю заліза, марганцю, сірководню і загальної підвищеною мінералізацією;
- б) природного органічного походження – гумінові кислоти, органічні речовини, що надходять зі стоками, водорості і найчастіше планктон;
- в) міського походження – продукти розпаду органічних речовин в міських стоках;
- г) промислового походження – різні хімічні стоки, миючі засоби, вуглеводні, гудрон і ін. смоли;
- д) сільськогосподарського походження – пестициди, гербіциди, мінеральні добрива.

Озон окисляє названі вище сполуки, приводячи до їх розщеплення, що супроводжується зникненням присмаків і запахів. Таким чином відбувається нейтралізація речовин шляхом свого роду «холодного спалювання».

Наприклад, при окисленні сірководню спостерігається виділення сірки:



Завдяки більш високій окисній здатності, озон в змозі діяти на такі сполуки, які не піддаються впливу інших хімічних реагентів. Обробка води надмірною кількістю озону не тягне за собою ніяких небажаних явищ: надмірний озон, будучи нестійким, знову перетворюється в кисень протягом декількох хвилин. Озонування не створює додаткових або змішуючих з'єднань, тоді як хлор дає з деякими речовинами складні сполуки, що викликають появу досить різких запахів. Наприклад, при обробці хлором води, що містить домішки фенолів, утворюється хлорфенол, що має вельми неприємний присмак і запах. Нарешті, при обробці озоном вода насичується киснем, що призводить до ефекту джерельної води.

Розглянемо принципову технологічну схему установки для комплексного очищення питної води. В даній установці реалізована традиційна схема очищення води озонуванням і фільтруванням. Схема установки показана на рис. 12.11.

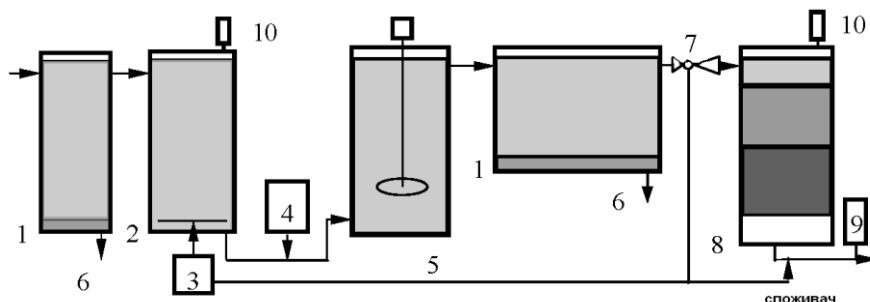


Рис. 12.11 – Схема підготовки питної води, де
1 – відстійник; 2 – контактний апарат; 3 – генератор озону; 4 – коагулянт;
5 – камера змішування; 6 – видалення відстою; 7 – ежектор; 8 – фільтр;
9 – консервант; 10 – деструктор озону

Перед надходженням в установку з води, що забирається у водоймі, спочатку вхідним фільтром грубого очищення, а потім у відстійнику 1 видаляються механічні домішки. Далі вода надходить на обробку реагентами. Зазвичай використовується схема з перед- та постозонуванням.

Передозонування води здійснюється після видалення механічних домішок і виконується в контактному апараті 2. Озон в контактний апарат надходить від генератора озону 3.

Передозонування має на меті проведення первинного знезараження води, видалення кольоровості, окислення і переведення в колоїдний стан розчинених металів. Одночасно озонування води сприяє реалізації процесу флокуляції (явище слабого пластоутворення – колоїдальної каламутності вод). Нерозчинні речовини, які утворилися, видаляються з води відстоюванням в спеціальних апаратах – відстійниках 1. Часто для посилення процесу флокуляції після передозонування в воду додають спеціальні речовини – коагулянти 4, які сприяють процесу злиття частинок у великі агломерати і більш швидкого випадання їх в осад. До таких речовин відносяться сульфат алюмінію і хлорне залізо. Для поліпшення змішування коагулянтів з водою в камерах змішування 5 здійснюють інтенсивне перемішування води і коагулянту. Після відстійника вода з рештою забруднень, що залишились в ній, піддається повторному озонуванню, метою якого є проведення проміжної дезінфекції та окислення органічних речовин.

У нашому прикладі введення озону в воду здійснюється за допомогою ежектора 7. Вода з розщепленими органічними речовинами надходить у фільтр 8, який може бути або комбінованим з піщаним та вугільним завантаженням, або складається з двох фільтрів, завантажених відповідно піском і активованим вугіллям.

Встановлено, що комбіноване очищення «озонування-фільтрація на активованих вугіллях» дозволяє ефективніше використовувати сорбційне завантаження фільтрів. Причиною є насичення води киснем при її озонуванні,

що створює сприятливі умови для життєдіяльності бактерій в товщі вугільного завантаження, які забезпечують біологічне окислення забруднень в порах завантаження і таким чином збільшують термін використання активованого вугілля до його регенерації. Після фільтрації вода піддається озонуванню для остаточної дезінфекції та надання необхідних смакових якостей. Як змішувальні пристрої тут використовуються контактна камера або комбінація з ежектора і турбулізатора (на рис. 12.11 не показані). На виході до споживача вода консервується з додаванням незначної кількості хлору 9, що перешкоджає розвитку бактерій у воді при її транспортуванні по трубопроводу.

2) Підготовка води в плавальних басейнах. Вимоги, що пред'являються до води в плавальних басейнах, аналогічні вимогам до питної води. У зв'язку з цим ідентичні і основні стадії обробки води: видалення домішок фільтром грубої очистки, озонування води в контактній камері, видалення суспензій, утворених у воді, піщаними і сорбційними фільтрами, консервація води хлором з дозуванням $C_{cl} = 0,05 \div 0,1$ мг/л. Однак на відміну від попереднього випадку вода рухається по замкнутому циклу з додаванням лише 10 % свіжої води.

3) Обробка стічних вод. Механізм впливу озону на забруднення природних і стічних вод ідентичний: це – молекулярне окислення і атака активними радикалами. В значній мірі механізм окислення обумовлений дипольною молекулою озону, яка фіксується на заряджених частинках і розриває подвійні зв'язки з утворенням окислених форм. Полярний характер молекули дозволяє також використовувати озон в процесі каталітичного окислення спільно з Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ультразвуком, ультрафіолетовим випромінюванням.

Ступінь забруднення стічних вод часто характеризують показниками «хімічного поглинання кисню (ХПК)» і «біологічного поглинання кисню (БПК)», які показують яку кількість кисню в мг йде на окислення домішок в 1 л води.

При високих концентраціях забруднювачів, що призводять до значного споживання озону, для зниження концентрації речовин, що видаляються за допомогою озону, в початок циклу (рис. 12.12) після аерації ставиться система біологічної очистки води з використанням мікроорганізмів: бактерій, цвілевих грибів, дріжджів та ін. У цьому випадку якщо на вході БПК і ХПК ~ 1000 , після аеротена ~ 500 , після біофільтра $\sim 30 \div 50$, то після озонування ~ 5 . Таким чином, озон використовується на виході очисної системи для доведення води до необхідної кондиції.

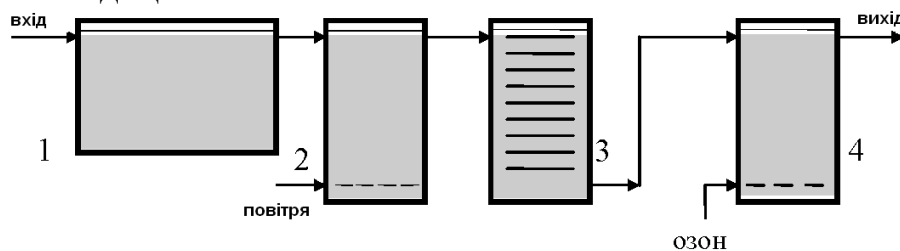


Рис. 12.12 – Біологічне очищення стічних вод з використанням озону, де 1 – відстійник; 2 – аеротен; 3 – біофільтр, 4 – контактний апарат

4) Медичні технології. Застосування озону для профілактики і лікування захворювань засновано на широкому спектрі терапевтичного впливу різних доз озону на організм. Озон діє як імуномодуючий, протизапальний, бактерицидний, противірусний, фунгіцидний, цитостатичний, антистресовий, анальгезуючий засіб.

Озонотерапія ефективно використовується в наступних випадках: хвороби верхніх дихальних шляхів і легеневі захворювання, інфекційні хвороби (для інактивації вірусів, бактерій, лікування гепатитів), в хірургії (виразки, пролежні, гангрени, опіки), в шкірно-венерологічній практиці (екземи, дерматити), в онкології, в фізіотерапії та курортології, зуболікарській практиці, а також у гігієні та санітарії. У багатьох випадках терапевтичний вплив озону ґрунтується на більш легкому його проникненні в хворі клітини, ніж у здорові.

Озон застосовується як при низьких концентраціях в газі (на рівні ГДК), наприклад, при лікуванні легень і верхніх дихальних шляхів, так і при високих концентраціях, наприклад, для розчинення озону у фізіологічному розчині і в дистильованій воді, або при здійсненні обробки озоном крові хворих (аутогемотерапія).

Для стерилізації медичного інструменту також застосовується вода з розчиненням у ній озоном.

У медичних установках має важливе значення висока концентрація озону в газі для прискорення процесу насичення рідини. В якості змішувача використовується барботажна камера.

5) Очищення газів, що відходять. Повітряні викиди не такі різноманітні за складом як стічні води. Вони містять майже завжди окис азоту і сірки, сірководень, летючу органіку. У ряді випадків спостерігаються викиди фтору, окису ванадію і синильної кислоти.

У зв'язку з тим, що озон реагує в рідкому середовищі набагато швидше, ніж в газовому і, крім того, в цьому випадку легше управляти процесом окислення, то практично завжди очистку повітряних викидів виконують пропусканням останніх через спеціальні поглинальні розчини, використовуючи для цієї мети поглинальні колони або інші аналогічні пристрої.

6) Застосування озону в сільському господарстві. Широкий спектр областей застосування озону в сільському господарстві: рослинництво, тваринництво, рибництво, кормо-виробництво і зберігання продуктів, зумовлює безліч озонових технологій, які умовно можна розділити на два великих напрямки. Перше має на меті стимулювати життєдіяльність живих організмів. З цією метою застосовуються концентрації озону на рівні ГДК, наприклад санація приміщень з тваринами і рослинами для поліпшення комфортності їх перебування. Другий напрям пов'язаний з придушенням життєдіяльності шкідливих організмів або з усуненням шкідливих забруднень з навколишньої атмосфери та гідросфери. Концентрації озону в цьому випадку набагато перевищують значення ГДК. До таких технологій відносяться дезінфекція тари і приміщень, очищення газових викидів птахоферм, свинарників, знешкодження стічних вод сільськогосподарських підприємств і т.д.

Лекція №18 Технології, засновані на використанні нерівноважної плазми газового електричного розряду

12.3 Технології конверсії газів в плазмі газового розряду

Питання конверсії газів в плазмі газового розряду необхідно розглядати як з точки зору перетворення токсичних сполук в нетоксичні, так і з точки зору зміни фізико-хімічних властивостей оброблюваних плазмою речовин для їх використання в реакціях подальшого синтезу або в спеціальних технологічних процесах.

Основними джерелами токсичних газоподібних забруднень є:

- Теплові електричні станції, при цьому головними забруднюючими компонентами є оксиди сірки (SO_2) і оксиди азоту (NO_x). Наприклад, для теплової електростанції потужністю $P = 800$ МВт, що використовує низькокалорійне буре вугілля з витратою 6 млн. тонн за рік і з вмістом сірки $S = 1,5$ %, викидається за рік в атмосферу до 170 тис. тонн діоксиду сірки SO_2 .

- Чорна і кольорова металургія. Найбільш серйозним газовим викидом також є діоксид сірки.

- Хімічна промисловість. Найбільш важливими газоподібними забруднюючими речовинами, з урахуванням обсягів їх виробництва і токсичності, є хлор, оксиди азоту і сірки, фтор та його сполуки, вуглеводні та їх хлорпохідні.

Традиційними методами очищення газів від шкідливих газоподібних домішок є:

1. Хіміко-каталітичні методи (каталітичне окислення – хімічні перетворення токсичних компонентів в нетоксичні на поверхні твердого каталізатора).

2. Адсорбційні методи (абсорбція в об'ємі рідини – фізична і хімічна – хемосорбція; адсорбція на поверхні пористих тіл).

3. Термічні методи (метод прямого спалювання в полум'ї).

В останні роки інтенсивно розвиваються технології очищення газоподібних забруднюючих викидів з використанням нових нетрадиційних методів:

1. На основі радіаційного опромінення.

2. Шляхом бомбардування газу елементарними частинками високої енергії, отриманими в прискорювачах (наприклад, пучком прискорених електронів).

3. З використанням плазми газового розряду (наносекундної імпульсної корони).

Перевагою останнього методу є технологічність, можливість одночасного видалення цілого ряду шкідливих домішок, відносно мала енергоемність і вартість.

Процес конверсії газів під дією імпульсного коронного розряду полягає в наступному. На стадії розвитку стримерів в газовому середовищі в різко неоднорідному полі під дією сильного поля в головках стримерів ($E \sim 150$ кВ/см) електрони набувають енергію порядку $5 \div 15$ еВ, достатню для збудження, дисоціації і іонізації молекул газу і утворення радикалів і хімічно

активних частинок (наприклад, O , OH , H_2O_2 та ін.) На другому етапі радикали і активні частинки взаємодіють з оксидами азоту й сірки, органічними газоподібними домішками, окислюючи, розкладаючи або перетворюючи їх у продукти, які більш просто видаляти з газу.

Оцінимо енергії зв'язків між атомами, енергії метастабільних станів молекул і атомів, енергії іонізації атомів і молекул, які найбільш часто зустрічаються.

Таблиця 12.3 Енергії зв'язку (дисоціації)

Зв'язок	$C - C$	$C = C$	$C - H$	$C - N$	$C = N$
Енергія дисоціації, еВ	3,61	6,35 2,74(π -зв'язок)	4,3	3,17	9,26

Таблиця 12.4 Енергії дисоціації, метастабільних станів та іонізації газів

Газ	Енергія дисоціації, еВ	Енергія метастабільного стану, еВ	Енергія іонізації, еВ
He	-	19,8	24,6
Ne	-	16,6	21,6
Ar	-	11,5	15,8
Kr	-	9,9	14,0
Xe	-	8,32	12,1
H ₂	4,2	8,4	15,6
N ₂	9,8	6,2	15,5
O ₂	5,1	0,98	12,5

З табл. 12.3 та табл. 12.4 видно, що енергія зв'язків менше енергії іонізації, тому в плазмі газового розряду концентрація вільних радикалів буде на декілька порядків більше, ніж концентрація іонів.

Саму ж ефективність такого плазмохімічного реактора прийнято виражати шляхом введення G -фактора – числа напрацьованих активних частинок, віднесеного до енерговкладу в розряд (вираженого, наприклад, в 100 еВ).

В імпульсному розряді залежний від часу G -фактор для сорту частинок j задається виразом:

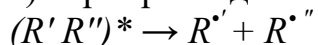
$$G_j(t) = \frac{N_j(t)}{\int_0^t UI dt},$$

де N_j – повне число частинок сорту j (інтеграл по об'єму розряду), напрацьоване до моменту часу t ; U і I – залежні від часу напруга і струм розряду.

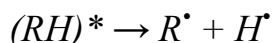
Радикали (в загальному вигляді позначаються буквою R) утворюються в результаті наступних процесів:

1. Дисоціації збуджених молекул:

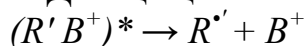
а) через розпад молекули



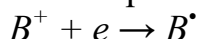
б) через відрив атома водню



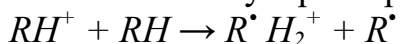
2. Дисоціації іонів:



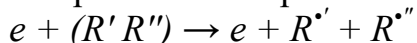
3. Нейтралізації іонів:



4. Іонно-молекулярних реакцій:



5. Прямого електронного удару:



Розглянемо очищення топкових газів від оксидів азоту і сірки. Топковий газ зазвичай складається з азоту N_2 , кисню O_2 , вуглекислого газу CO_2 , води H_2O , оксидів азоту NO_x і оксиду сірки SO_2 .

Вимоги до плазми газового розряду:

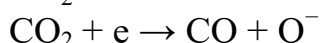
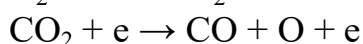
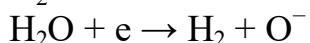
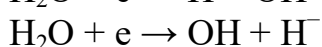
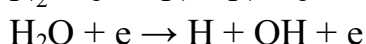
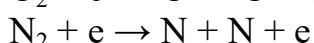
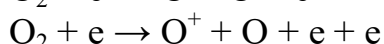
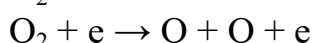
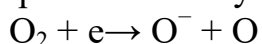
- плазма повинна бути різко нерівноважною $T_e \gg T_i$, щоб на речовини впливали електрони, а газ не нагрівався, тобто теплові втрати були мінімальні,
- рівномірне заповнення об'єму з оброблюваним газом плазмою газового розряду,

- можливість регулювання енергії впливаючого розряду.

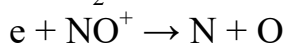
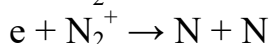
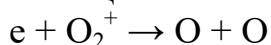
Даним вимогам задовольняє плазма імпульсного газового розряду.

Одночасне очищення топкових газів від оксидів азоту і сірки при застосуванні наносекундної імпульсної корони ґрунтується на процесах окислення NO і SO_2 , викликаного активними частинками (OH , H_2O_2 , O та ін.) Ці активні частинки ініціюють хімічну конверсію NO і SO_2 в присутності кисню і водяної пари в NO_2 , HNO_2 , HNO_3 , ..., і, відповідно, в SO_3 , H_2SO_3 , H_2SO_4 , ...

Активні частинки напрацьовуються в головках стримерів при зіткненні електронів з молекулами газів, що входять до складу топкового:

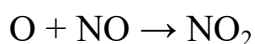


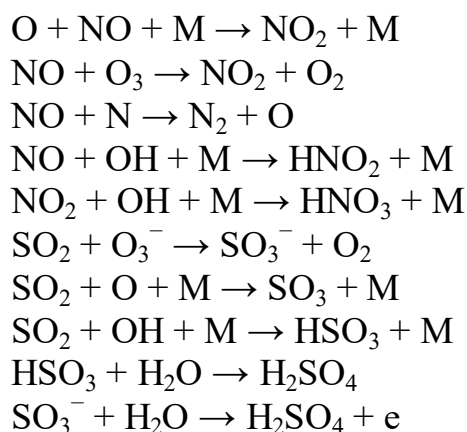
Іншим джерелом активних частинок є реакції електрон-іонної рекомбінації:



Константи швидкостей реакцій є функціями питомої напруженості електричного поля E/N і залежать від складу топкового газу.

Напрацьовані активні частинки вступають в реакцію з оксидами азоту і сірки:





Спочатку всі ці реакції проходять в газовій фазі. Так як тиск насичення азотних і сірчаних кислот низький, то вони взаємодіють з водяною парою, утворюючи крапельний аерозоль. Для нейтралізації кислот додається аміак. Краплі аерозолі добре адсорбують і оксиди, і аміак. Аміак у присутності кисню і пари води окисляє частину діоксиду сірки і взаємодіє з кислотами з утворенням нітратів і сульфатів амонію у твердому стані.

Схематично діаграму очищення топкового газу можна представити в наступному вигляді (рис. 12.13).

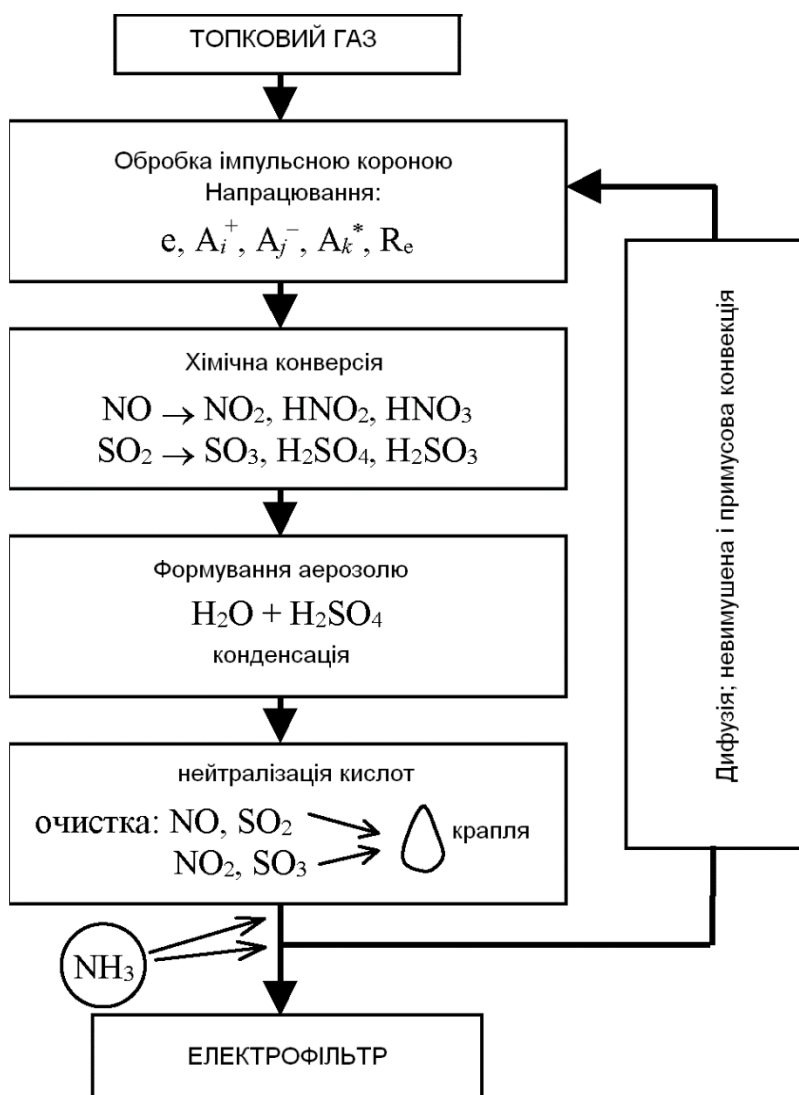


Рис. 12.13 – Схема стадій очищення топкових газів

Сам технологічний цикл очищення топкових газів від оксидів азоту і сірки, наприклад, на тепловій електростанції, виглядає наступним чином (рис. 12.14).

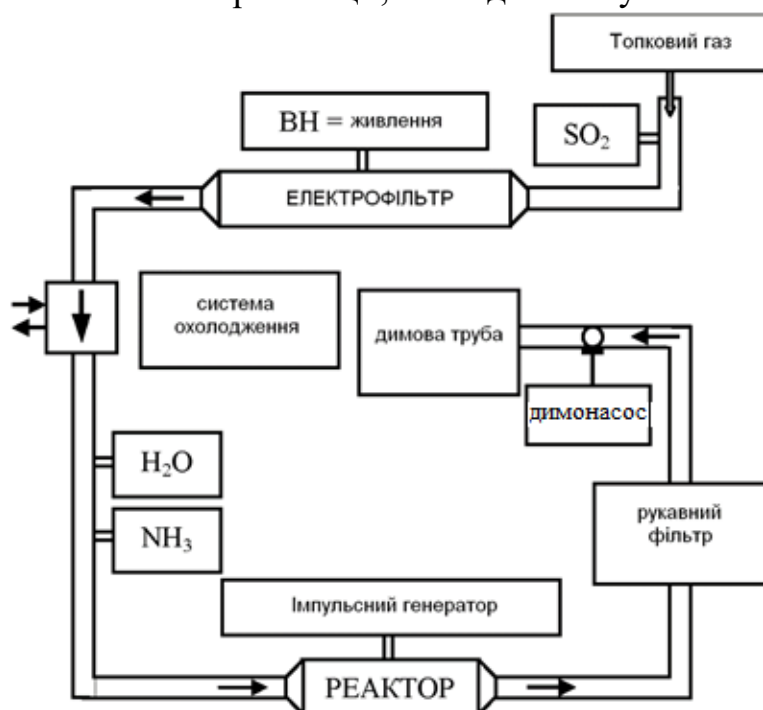


Рис. 12.14 – Технологічна схема очищення топкових газів

Газ, при температурі 150 °С, проходить через електрофільтр, де витягуються тверді домішки, а потім охолоджується до 65 °С в градирні. Вода, що випаровується, не тільки відбирає тепло від топкового газу, але і збільшує його вологість, яка необхідна для процесів видалення оксидів сірки та азоту в плазмовому реакторі.

В реакторі охолоджений топковий газ піддається впливу імпульсного коронного розряду. Системи електродів, що використовуються для одержання плазми, представлені на рис. 12.15:

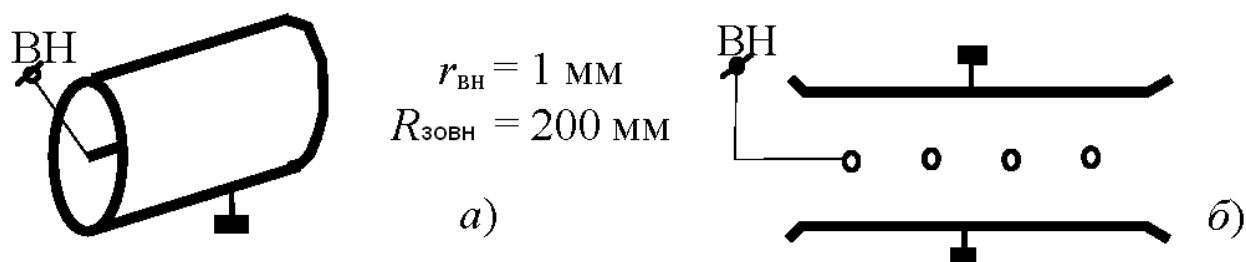


Рис. 12.15 – Системи електродних пристроїв для створення плазми імпульсного газового розряду, де а) коаксіальні циліндри; б) ряд проводів між площинами

Форма імпульсу живлячої напруги представлена на рис. 12.16.

Напруга живлення має таку форму, щоб розряд не переходив в свою завершальну стадію. Тому розряд носить форму стримерів, які перетинають

весь газовий проміжок, а переростання їх в лідерну стадію не відбувається, так як напругу живлення різко обрізають (у часі).

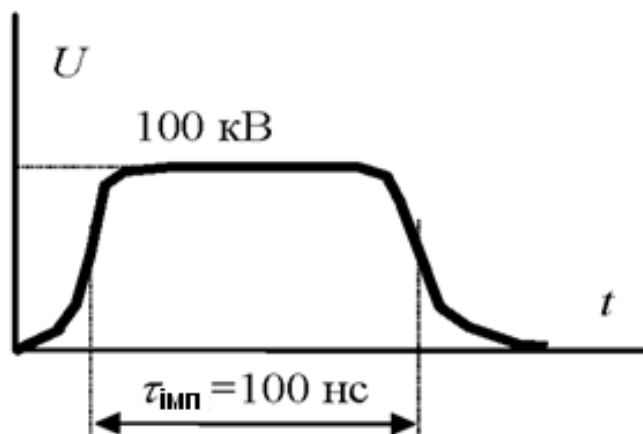


Рис. 12.16 – Форма імпульсу напруги

Перед реактором до газу додається аміак, щоб нейтралізувати кислоти, що утворюються при реакціях оксидів з радикалами, утвореними в розряді.

Потім потік газу проходить через колектор продукту, де солі амонію (порошок) збираються як добриво.

Перед реактором до газу додається аміак, щоб нейтралізувати кислоти, що утворюються при реакціях оксидів з радикалами, утвореними в розряді.

Потім потік газу проходить через колектор продукту, де солі амонію (порошок) збираються як добриво.

12.4 Модифікація поверхні матеріалів в плазмі газового розряду

У широкому сенсі під модифікацією поверхні матеріалів в плазмі газового розряду розуміється зміна властивостей поверхні за участю низькотемпературної газорозрядної плазми. Властивості поверхні оброблюваного матеріалу змінюються в результаті фізико-хімічних процесів, що відбуваються на межі розділу газ (газове середовище) – тверде тіло:

- за рахунок розриву старих і утворення нових зв'язків вихідного матеріалу;
- за рахунок нанесення і прищеплення до поверхні матеріалів інших речовин.

При модифікації поверхні матеріалу протікають дві конкуруючі реакції (процесу):

- утворення плівки речовини шляхом осадження з газової фази;
- травлення, що призводить до видалення речовин із поверхні матеріалу.

На рис. 12.17 приведена схема модифікації поверхні твердого тіла в плазмі газового розряду.

При наявності процесів модифікації можна виділити три випадки:

- а) плазма є одночасно середовищем проведення, джерелом частинок, які беруть участь в процесі, і стимулятором (активатором) процесу;

б) плазма служить тільки для активації частинок, які беруть участь в процесі;

в) плазма використовується тільки для активації частинок поверхонь, які беруть участь в процесі, або для стимуляції самого процесу.

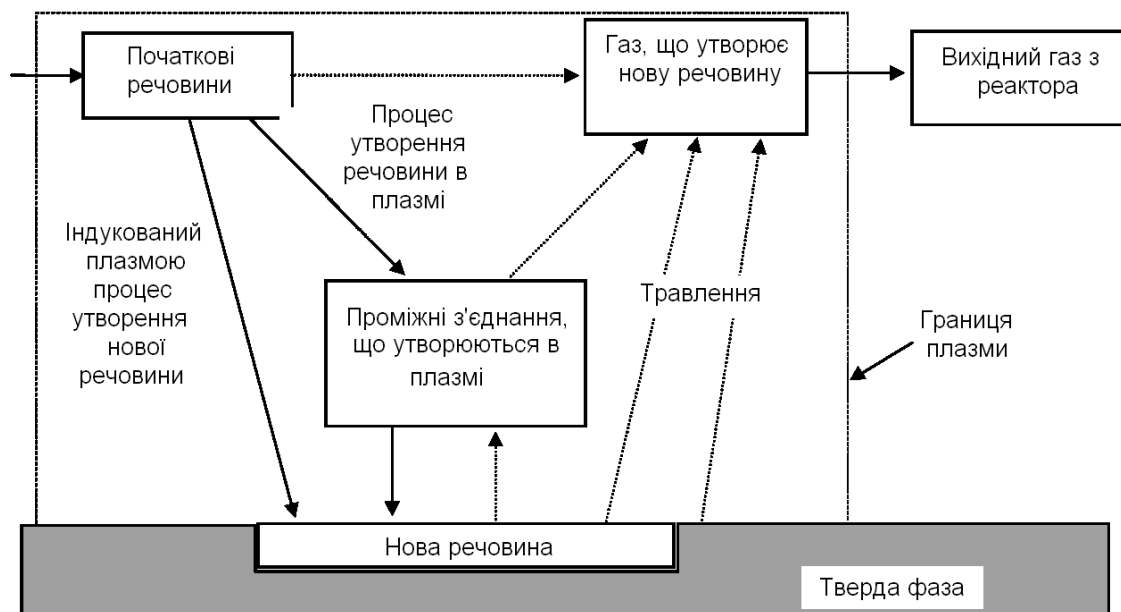


Рис. 12.17 – Схема модифікації поверхні в плазмі газового розряду

У першому випадку оброблювана поверхня твердого тіла знаходиться в контакт з плазмою, у другому – поза плазмою, в третьому – можливі обидва варіанти.

Різні процеси обробки можна об'єднати в три великі групи:

1. Власне сама модифікація поверхневих шарів матеріалів (окислення, нітридизація, анодизація та ін.)
2. Видалення матеріалу з поверхні твердого тіла (всі види розпилення, травлення та очищення).
3. Нанесення плівки матеріалу на поверхню твердого тіла.

Як приклад, розглянемо модифікацію поверхні полімерних матеріалів, у яких вона має найбільш широку гаму технологічних застосувань.

Всі зміни фізичних і хімічних властивостей тонкого поверхневого шару полімеру починаються із зміни його хімічного складу і структури. Причому, будь-які хімічні перетворення в цьому шарі під дією нерівноважної плазми можуть ініціюватися тільки генерованими нею активними частинками, до яких відносяться кванти УФ-випромінювання, електронно- та коливально-збуджені молекули, вільні атоми і радикали, а також заряджені частинки, бомбардуючі поверхню оброблюваного матеріалу.

При всьому різноманітті генерованих в плазмі активних частинок їх дія на матеріали обмежується дуже невеликим поверхневим шаром. У разі полімерних матеріалів його товщина, як правило, менше 1 мкм.

Таким чином, всі технологічні ефекти плазмової обробки полімерних матеріалів визначаються набором фізико-хімічних процесів, ініційованих активними частинками плазми в тонкому поверхневому шарі.

Фізико-хімічні і технологічні ефекти плазмової обробки полімерів можуть бути представлені у вигляді таблиці 12.5.

Таблиця 12.5

Хімічні та фізичні зміни	Технологічні ефекти
<p>1. Хімічні зміни поверхневого шару.</p> <p><u>1А.</u> Утворення подвійних зв'язків і нових функціональних груп, наприклад -ОН, -CN; = NH; -C = O; -NH₂; -COOH; зшивання полімерних ланцюгів.</p> <p><u>1В.</u> Процеси деструкції:</p> <ul style="list-style-type: none"> • розриви ланцюгів макромолекул; • руйнування функціональних груп; • утворення газоподібних продуктів травлення. <p><u>1С.</u> Інші зміни:</p> <ul style="list-style-type: none"> • зміна ефективної степені полімеризації і середньої молекулярної маси; • зміна степені окислення окремих атомів в макромолекулах, наприклад, атомів кисню, зміна окисно-відновлюваних властивостей поверхні. 	<p>Зміна змочуваності, капілярності, загального вологовбирання.</p> <p>Зростання насиченості забарвлення, зменшення часу забарвлення, поліпшення друкувальних властивостей.</p> <p>Модифікація антиресорбційних властивостей, зменшення забруднюваності.</p> <p>Поліпшення адгезійних властивостей для нанесення покриттів і виготовлення композитних матеріалів.</p> <p>Зміна розчинності поверхневого шару в органічних та неорганічних розчинниках.</p>
<p>2. Зміна структури поверхневого шару.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Зміна степені кристалічності. • Зміна температури фазових переходів. • Фазові переходи, ініційовані плазмою. • Утворення мікродоменних структур. • Збільшення ефективної площі поверхні. • Зміна поверхневої пористості і проникності. • Зміна коефіцієнтів дифузії газів і рідин в полімерах. 	<p>Поліпшення погодо-стійкості полімерів.</p> <p>Уповільнення міграції пластифікатора до поверхні матеріалу.</p> <p>Модифікування властивостей іонообмінних смол та іон-селективних мембран.</p> <p>Дезінфекція поверхні полімеру.</p> <p>Додання полімерам біосумісності.</p>
<p>3. Зміна фізичних властивостей поверхневого шару.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Зміна поверхневої енергії. • Зміна коефіцієнта поверхневого тертя. • Зміна механічних властивостей. • Зміна спектрів поглинання в ІЧ-, УФ- і видимій областях. • Зміна поверхневої провідності, 	<p>Зростання міцності, еластичності та опору тертю.</p> <p>Зменшення усадки та звойлочнюватості вовни.</p> <p>Додання незминання тканинам.</p> <p>Зміна забарвлення і блиску поверхні полімеру.</p> <p>Згладжування поверхні і зменшення</p>

діелектричної постійної і тангенса кута діелектричних втрат. • Накопичення поверхневого заряду.	поверхневого тертя. Додання необхідних електричних властивостей, включаючи антистатичні.
--	---

Травлення – це операція повсюдного або локального видалення поверхневих шарів матеріалу з метою очищення його від забруднень або додання рельєфу його поверхні.

За фізико-хімічним механізмом впливу частинок низькотемпературної газорозрядної плазми на поверхню процеси травлення можна розділити на три групи:

1. Іонне травлення, при якому поверхневі шари матеріалів видаляються тільки в результаті фізичного розпилення. Травлення здійснюється енергетичними іонами газів ($0,1 \div 5,0$ кеВ), що хімічно не реагують з оброблюваним матеріалом (зазвичай іонами інертних газів).

2. Плазмохімічне травлення, при якому поверхневі шари матеріалів видаляються в результаті хімічних реакцій. Хімічні реакції відбуваються між хімічно активними частинками і поверхневими атомами з утворенням летких продуктів.

3. Іонно-хімічне травлення, при якому поверхневі шари матеріалів видаляються в результаті як фізичного розпилення енергетичними іонами, так і хімічних реакцій між хімічно активними частинками і атомами матеріалів.

Найбільш широке застосування процес травлення знайшов при виготовленні виробів електроніки, коли необхідно в тонких плівках або в поверхневому шарі напівпровідникової підкладки сформувати топологічний малюнок елементів схеми, істотно зменшити розміри елементів структур з одночасним збільшенням точності, надійності та автоматизації їх виробництва.

Плазмохімічні методи осадження таких плівок дають можливість наносити тугоплавкі і багатокомпонентні сплави, діелектрики, напівпровідники, тобто практично всі матеріали, змінюючи структурні, механічні, електричні, феромагнітні та інші властивості твердої поверхні.

При іонному напиленні плівкове покриття одержують розпиленням в плазмі інертних газів матеріалу мішені при подачі на неї негативного потенціалу і бомбардуванні іонами плазми.

При іонно-плазмовому напиленні відбувається нанесення складних плівкових покриттів розпиленням мішені в плазмі, що містить хімічно активний газ. У цьому випадку плівки на підкладці формуються в результаті хімічної взаємодії розпорошеного матеріалу і активного газу (метану, кисню, азоту).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна література

1. Отроверхов М. Я. Методи дослідження електротехнічних систем і комплексів: монографія / М. Я. Отроверхов, А. М. Сільвестров, К. Х. Зеленський. - Київ : ТАЛКОМ, 2019. – 300 с.
2. Бржезицький В. О., Ісакова А. В., Рудаков В. В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ «ХП» – Торнадо, 2005. – 930 с.
3. И. П. Верещагин, В. И. Левитов, Г. З. Мирзабекян. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М.: «Энергия», 1974. – 480 с.
4. О. А. Аношин, А. А. Белогловский, И. П. Верещагин. Высоковольтные электротехнологии. – М.: МЭИ, 1999. – 204 с.
5. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. – М.: Высшая школа, 1988.
6. Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологии. – М.: Высшая школа, 1984.
7. Вендик О.Г., Горин Ю.Н., Попов В.Ф. Корпускулярно-фотонная технология. – М.: Высшая школа, 1984. – 240с.
8. Симонов В.В., Корнилов Л.А., Шашелев А.В., Шокин Е.В. Оборудование ионной имплантации. – М.: Радио и связь, 1988.
9. Техника высоких напряжений. Лабораторный практикум. Под ред. М.Е. Иерусалимова. м К.: Вища школа, 1987.
10. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. Под ред. Дж.М. Поута. - М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
11. Е. П. Фомичев. Электротехнологические промышленные установки. – К.: Вища школа, 1979. – 264 с.
12. Бржезицкий В. А. Расчет и исследование электропроводности низкотемпературных плазм. Теплофизика высоких температур, 10, №1, с. 7–21. 1972.

Допоміжна література

1. Гайзиг, Шиллер, Панцер. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергоиздат, 1980. – 528 с.
2. Моряков О.С. Элионная обработка. – М.: Высшая школа, 1990. – 128 с.
3. Габович М.Д., Плешивцев Н.В., Семашко Н.Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. – М.: Энергоатомиздат, 1986.

4. Диденко и др. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов.
5. Назаренко О.К. Электронно-лучевая сварка. К.: Наукова думка, 1987.
6. Электротехнологические промышленные установки. Под ред. Свенчанского А.Д. – М.: Энергоиздат, 1982.
7. Энергетическая электроника: Справ. пособие. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
8. Москалев, Сергеев, Шестаков. Измерение параметров пучков заряженных частиц.
9. Берри Р., Холл П., Гаррис М. Тонкопленочная технология. Пер. с англ. – М.: Энергия, – 1972.
10. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА.- М.: Высшая школа, 1987. – 376 с.
11. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
12. Готра З.Ю. Справочник по технологии микроэлектронных устройств. – Львов: Каменяр, 1986. – 288 с.
13. Попов В.Ф. Ионно-лучевые установки.
14. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – 1983.
15. Завьялов и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. 1989.
16. Алямовский И.В. Электронные пучки и пушки. – М.: Советское радио, 1966.
17. М.Силадьи. Электронная и ионная оптика.
18. Абрамян. Интенсивные электронные пучки.
19. Молоковский, Сушков. Интенсивные ионные пучки.
20. Рыкалин, Углов, Зуев. Основы электронно-лучевой обработки материалов. 1978.
21. Башенко В.В. Электронно-лучевые установки. 1972.
22. Бронштейн, Фрайман. Вторичная электронная эмиссия.
23. Векслер. Вторичная ионная эмиссия.
24. Таблицы физических величин, Под редакцией Кикоина.
25. Шульман, Фридрихов. Вторично-эмиссионные методы исследования твердого тела.
26. Добрецов, Гомоюнова. Эмиссионная электроника. 1966.
27. Черепин, Васильев, Методы и приборы для анализа поверхности материалов.
28. Мак-Даниель. Процессы столкновений в ионизированных газах.
29. Гришин, Лесков. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов.
30. Соболев. Физические основы электронной техники.
31. Техническая документация к электронно-лучевой установке типа ЭЛУ-5.
32. Ионная имплантация и лучевая технология. Под ред. Дж.С. Вильямса, Дж.М. Поута. – К.: Наукова думка, 1984. – 240 с.

33. Физические основы лазерной и пучковой технологии // В сб. “Физика плазмы. Т.3. Физические основы лазерной микротехнологии” (Итоги науки и техники). – М.: ВИНТИ АН СССР, 1989. – 164 с.
34. М. А. Алиев, А. Е. Гоник. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров.

Перелік питань для контролю засвоєння лекційного матеріалу навчальної дисципліни «Електротехнологічні установки та системи»

ДО ТЕМИ 1

1. Два визначення технології.
2. Складові типового виробництва продукції.
3. Матеріальна сфера виробництва.
4. Виробничий та технологічні процеси.
5. Інформаційне забезпечення виробництва.
6. Часткова, комплексна та повна автоматизація виробництва.
7. Автоматизована система управління технологічним процесом.

ДО ТЕМИ 2

8. Визначення електротехнології.
9. Структура електротехнологічного комплексу.
10. Електротехнологічна установка, електротехнологічна система.
11. Сфера застосування електростатичної технології.
12. Електророзрядна та плазмова технології.
13. Технології перетворення електроенергії в теплову енергію та в енергію світла.
14. Лазерна та променева технології.
15. Електрогідравлічна та магнітно-імпульсна технології.

ДО ТЕМИ 3

16. Поняття плазми. Ступінь іонізації. Частково та повністю іонізована плазма.
17. Рівноважна та нерівноважна плазма, приклади.
18. Дебаєвський радіус екранування.
19. Вплив електричного поля на стан плазми.
20. Електропровідність та рухливість електронів.
21. Частота зіткнень електронів в плазмі.
22. Розрахунок рухливості електронів.

ДО ТЕМИ 4

23. Коронний розряд та його форми.

- 24. Система рівнянь уніполярного коронного розряду.
- 25. Характеристики коронного розряду між коаксіальними циліндрами.
- 26. Вольт-амперна характеристика коронного розряду.
- 27. Початкові та пробивні напруги проміжків при коронному розряді.

ДО ТЕМИ 5

- 28. Процеси електричного зарядження частинок, типова структура електростатичної технологічної установки.
- 29. «Ударне» іонне зарядження частинок.
- 30. Дифузійне іонне зарядження частинок.
- 31. Зарядження частинок при контакті з електродом.
- 32. Статична електризація. Правило Коєна.
- 33. Рух частинок в електричному полі, визначення діючих сил.
- 34. Число Рейнольдса. Сили опору руху сферичної частинки при різних числах Рейнольдса.
- 35. Число Стокса, безінерційне наближення.
- 36. Залежність рухливості сфероподібних частинок від радіусу.

ДО ТЕМИ 6

- 37. Функціональна схема електрофільтру та його переваги.
- 38. Ступінь очищення газу в електрофільтрі.
- 39. Вплив концентрації дисперсної фази на характеристики коронного розряду і процес очищення газу електрофільтром.
- 40. Виникнення зворотної корони в електрофільтрах та способи послаблення її дії.
- 41. Типи та конструкції електрофільтрів.

ДО ТЕМИ 7

- 42. Процес зарядження і розпилення фарби.
- 43. Фактори впливу на якість електрофарбування.
- 44. Переваги порошкових покриттів.
- 45. Пристрої для нанесення порошкових полімерних покриттів в електричному полі.
- 46. Розпилювачі порошоків з внутрішнім та зовнішнім зарядженням.
- 47. Виникнення зворотної корони в осадженому шарі порошку та способи послаблення її дії.

ДО ТЕМИ 8

- 48. Класифікація електросепараторів.
- 49. Барабанний електростатичний сепаратор.
- 50. Барабанний коронний сепаратор.
- 51. Барабанний коронно-електростатичний сепаратор.
- 52. Лотковий похилий електростатичний сепаратор.
- 53. Барабанний трибоелетростатичний сепаратор.
- 54. Камерний електростатичний сепаратор вільного падіння.

- 55. Сепаратор з «киплячим» шаром.
- 56. Піроелектричний сепаратор.
- 57. Діелектрична сепарація.

ДО ТЕМИ 9

- 58. Стадії електрофотографічного процесу.
- 59. Різновиди сухого проявлення прихованого електростатичного зображення.
- 60. Електрокрапльєструменевий друк.

ДО ТЕМИ 10

- 61. небезпечні прояви статичної електризації.
- 62. Наростання густини заряду в нафті при її проходженні по технологічному тракту.
- 63. Сумарний об'ємний заряд нафти в приймальному резервуарі.
- 64. Два методи зменшення заряду нафти в приймальному резервуарі.
- 65. Займання парів речовин.
- 66. Групи палив по рівню займистості.
- 67. Вимірювання струмів електризації.
- 68. Вимірювання параметрів електричних зарядів і напруженості поля.
- 69. Способи захисту від розрядів статичної електрики.
- 70. Застосування нейтралізаторів статичної електрики.

ДО ТЕМИ 11

- 71. Вимоги до вмісту води і солей в нафтопродуктах.
- 72. Седиментація крапель води в нафтопродукті.
- 73. Рух заряджених крапель в електричному полі в нафтопродукті.
- 74. Процеси укрупнення крапель води.
- 75. Зарядження крапель води в нафтопродукті.
- 76. Схема зневоднення та знесолення нафтопродуктів. Електродегідратори.
- 77. Глибоке та надглибоке зневоднення нафтопродуктів.
- 78. Зневоднення високообводнених нафт і аномально стійких емульсій.

ДО ТЕМИ 12

- 79. Поняття кінетики плазмохімічних реакцій.
- 80. Особливості плазмохімічних реакцій.
- 81. Фізико-хімічні та біологічні властивості озону.
- 82. Процеси електросинтезу озону.
- 83. Промислові генератори озону.
- 84. Основні області технологічного застосування озону.
- 85. Обробка води з використанням озону.
- 86. Технології конверсії газів в плазмі газового розряду.
- 87. Схема стадій очищення топкових газів.
- 88. Технологічна схема очищення топкових газів.

- 89. Особливості імпульсного коронного розряду для обробки топкових газів.
- 90. Схема модифікації поверхні матеріалів в плазмі газового розряду.
- 91. Залежність фізико-хімічних змін та технологічних ефектів при обробці матеріалів в плазмі газового розряду.
- 92. Травлення поверхні матеріалів в плазмі газового розряду.